

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikka

Tietoliikennejärjestelmät

2016

Lassi Ruukonen

LANGATTOMAN ANTURIVERKON RADIOPIIRIN AJURIOHJELMISTO

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikka

2016 | 43

TkL Juha Nikkanen, DI Riku Lindström

Lassi Ruokonen

LANGATTOMAN ANTURIVERKON RADIOPIIRIN AJURIOHJELMISTO

Tässä opinnäytetyössä ohjelmoitiin rajapinta paristokäyttöisen laitteen radiopiirille langattomaan tiedonsiirtoon. Työssä tutkittiin radiopiirin ominaisuuksia ja selvitettiin luotettavan sekä energiatehokkaan tiedonsiirron avaintekijöitä. Työ koostui järjestelmän tekniikan valinnasta sekä kontrolliohjelmiston suunnittelusta C-kielellä Texas Instrumentsin CC1200 –kehitysalustalle. Ohjelmiston ja ominaisuuksien toimintaa testattiin virrankulutuksen näkökulmasta.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin toimiva ohjelmisto, joka ohjaa radiopiiriä luotettavasti ja energiatehokkaasti. Anturitietoa lähetetään asetetuin aikavälein isäntälaitteelle, joiden välissä virrankulutus minimoidaan. Myös anturitiedon lähetys on optimoitu energiatehokkaaksi ja luotettavaksi.

Tämän työn tuloksena syntynyt ohjelmisto ei ole suoraan käytettävissä lopullisessa tuotteessa, vaan vaatii jatkokehitystä ollakseen yhteensopiva käytettävän järjestelmän kanssa. Käytetyn radiopiirin ominaisuuksien tutkiminen on toimeksiantajalle arvokasta tietoa, jota voi käyttää hyödyksi myöhemmissä laitekehityksen vaiheissa.

ASIASANAT:

langaton tiedonsiirto, mikrokontrollerit, ohjelmointi, radioverkot

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree programme in electronics

2016 | 43

Lic.Sc. (Tech.) Juha Nikkanen, M.Sc. Riku Lindström

Lassi Ruokonen

TRANSCIVER INTERFACE FOR WIRELESS SENSOR NETWORK

An interface for wireless transmission in a battery-powered sensor network was programmed for this thesis. Transceiver configurations and transfer protocols were surveyed for optimal energy consumption. The work carried out for this thesis was commissioned by Pietiko Ltd and involved programming the interface for Texas Instruments Evaluation Board and researching possibilities of the transceiver. The programming language used was C. The operability of the system was tested for current consumption and stability. The system's effectiveness and sensitivity was analyzed by carrying out a range test.

The outcome of this thesis is a fully operational software. Sensor information is sent from the master node at configured intervals. During intermissions, the transceiver is in power down -mode. Transmissions are optimized for maximum battery life and low spuriousness.

This thesis does not provide the code used in the final product because it will require porting to be fully compatible with the system where it will finally be implemented. The research carried out for this thesis is valuable information for the client organization and can be utilized on later phases in the development process.

KEYWORDS:

microcontrollers, programming, radio networks, wireless data transfer

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	VI
1 JOHDANTO	1
2 VAATIMUSMÄÄRITTELYT	2
3 TIEDONSIIRTO	3
3.1 Radioaaltojen eteneminen	3
3.2 Modulaatiomenetelmät	6
3.2.1 FSK-taajuusmodulaatio	7
3.2.2 GFSK-modulaatio	8
3.2.3 MSK-modulaatio	8
3.3 IEEE 802.15.4g –standardi	9
3.4 SPI-väylä	11
4 KEHITYSYMPÄRISTÖ	13
4.1 CC1200-radiopiiri	13
4.2 SmartRF Transceiver Evaluation Board	13
4.3 Kehitysohjelmistot	14
4.3.1 SmartRF Studio	14
4.3.2 Packet Sniffer	15
4.3.3 IAR Embedded Workbench	15
5 SUUNNITTELU	16
5.1 CC1200-radiopiirin ominaisuuksia	16
5.1.1 LBT	16
5.1.2 ACK-kuittausviesti	17
5.1.3 FEC-virheenkorjaus	17
5.1.4 Spektrin tasoitus	18
5.1.5 Manchester-koodaus	19
5.1.6 Tehoramppi	19
5.1.7 Wake on Radio	20
5.1.8 RX Sniff Mode	20
5.1.9 Kanavasuodatin	21
5.2 Virrankulutus	22

5.2.1 Virrankulutusmittaukset	23
5.2.2 Virrankulutuksen arviointi	26
5.3 Standardi kehysrakenne CC1200-radiopiirillä	27
5.3.1 Synkronointitavut	28
5.3.2 Data-alue	28
5.3.3 CRC-laskentatulos	29
5.4 802.15.4g tuki	29
5.5 Hyväksytty kokoonpano	30
6 KONTROLLIOHJELMISTO	32
6.1 Esimerkkiohjelmiston analyysi	32
6.2 Tietueet	33
6.3 Virranhallinta	34
6.4 Kehysrakenne	35
6.5 Kantamamittaukset	37
7 YHTEENVETO	41
LÄHTEET	42

LIITTEET

Liite 1. Esimerkkikoodi LBT:n käytöstä.

Liite 2. Mittausyksikön toimintakaavio.

TAULUKOT

Taulukko 1. MSK-modulaatiolla taajuusdeviaation ja symbolinopeuden suhde on oltava asetuksissa $\frac{1}{4}$, jotta modulaatioindeksi on 0,5. [4]	9
Taulukko 2. Radiopiirin virrankulutusta sekä pariston kestoja arvioitu vuositasona.	25
Taulukko 3. Virtalaskelma eri lähetysväleillä ACK- ja LBT-tekniikoilla.	27

KÄYTETYT LYHENTEET

dBm	desibeliä milliwattiin nähden
ACK	vastaanotetun viestin kuittausviesti (acknowledgement)
AGC	automaattinen tasonsäätö (Automatic Gain Control)
ASK	amplitudiavainnus (Amplitude Shift Keying)
BW	kaistanleveys (bandwidth)
CCA	vapaan kanavan arvio (Clear Channel Assessment)
CRC	tarkisteavain (Cyclic Redundancy Check)
FFD	toiminnoiltaan rajoittamaton laite (Full Function Device)
EM	evaluointimoduuli (Evaluation Module)
FSK	taajuusavainnus (Frequency Shift Keying)
FSL	vaimennus vapaassa tilassa (Free Space Loss)
GFSK	gaussinen taajuusavainnus (Gaussian Frequency Shift Keying)
GPIO	yleiskäyttöinen portti (General Purpose Input/Output)
ISI	symbolien välinen keskinäisvaikutus (Intersymbol Interference)
LOS	näköyhteys (Line of Sight)
LR-WPAN	langaton tietoverkko (Low-Rate Wireless Personal Area Network)
MSK	taajuusmodulaatiotyyppi (Minimum Shift Keying)
OOK	amplitudiavainnus (On-Off Keying)
RFD	toiminnoiltaan rajoitettu laite (Reduced Function Device)
RX	vastaanottotila (Reception)
RX FIFO	vastaanotetun datan puskurimuisti (Reception First In-First Out)
SPI	sarjamuotoinen oheislaiteväylä (Serial Peripheral Interface)
TI	Texas Instruments
TX	lähetystila (Transmission)
TrxEB	evaluointialusta (Evaluation Board)

TX FIFO	lähetettävän datan puskurimuisti (Transmission First In-First Out)
VCO	Jänniteohjattu oskillaattori (Voltage Controlled Oscillator)
XOR	ehdoton tai (eXclusive OR)

1 JOHDANTO

Langattomat sensoriverkot ovat yleistyneet viime vuosina. Komponenttien halpenemisen myötä sensoriverkkoja on saatavilla moneen eri tarkoitukseen. Paristokäyttöisyys antaa joustavuutta laitteen käyttöön. Paristokäyttöisen langattoman sensoriverkon tulisi toimia mahdollisimman pienellä energiankulutuksella, jotta sen toiminta-aika saataisiin maksimoitua. Langaton sensoriverkon laite on suunniteltava toimintavarmaksi, koska sen huolto saattaa olla sijainnista riippuen vaikeaa. Kun sensoriverkko on asetettu toimintaan, sen tulisi toimia, kunnes sen paristo loppuu.

Pietiko Oy suunnittelee kaupallista lyhyen kantaman paristokäyttöistä sensoriverkkojärjestelmää, johon suunnitellaan tässä työssä radiopiirin kontrolliohjelmisto. Radiopiirin tyyppi on CC1200, jonka ohjaus suoritetaan mikrokontrollerilla. Ohjelmiston pääasialliset tavoitteet ovat pieni virrankulutus, toimintavarmuus sekä hyvä kantama.

Lauri Viitasen 2010 julkaisema insinöörityö käsittelee laajasti vastaavantyyppisen anturiverkon suunnittelua. Elina Vaara-Sjöblom käsittelee 2008 julkaistussa opinnäytetyössä aukottomasti verkonmuodostusta IEEE 802.15.4 –standardiin perustuvassa sensoriverkossa. Edellä mainitut opinnäytetyöt ovat antaneet suuntaa tämän työn tekemisessä. Ne myös tukevat tiedoillaan suunnittelijaa anturiverkon kehityksessä.

Työssä luodaan katsaus radiotaajuuksilla tapahtuvaan tiedonsiirtoon sekä tekniikkoihin, joilla tiedonsiirron laatua sekä varmuutta pystytään hallitsemaan. Pääasiallinen paino keskittyy radiopiirin energiatehokkuuteen sekä radiolinkin protokollaan. Vaikka työosuus muodostuu ohjelmoinnista, siihen lukeutuu paljon tiedon hankkimista lähteistä.

Ohjelmiston suunnittelussa käytetään apuna Texas Instrumentsin valmistamaa kehitysalustaa. Kehitysalusta antaa hyvän lähtökohdan suunnittelun alkupuolella, ja ominaisuuksien ansiosta se antaa tukea myöhemmässäkin vaiheessa.

2 VAATIMUSMÄÄRITTELYT

Työn tarkoitus on ohjelmoida rajapinta järjestelmässä käytettävälle TI:n (Texas Instruments) CC1200-radiopiirille, jonka toimintaa ohjataan mikrokontrollerilla. Laitteista muodostetaan anturiverkko, jossa useita laitteita lähettää anturitietoa isäntälaitteelle. Isäntälaitte poimii tiedot ja välittää ne esimerkiksi pilvipalvelimelle. Anturilaitte toimii paristovirralla, joten sen virrankäyttö tulee huomioida tarkkaan. Alustavien suunnitelmien mukaan laite lähettää tietoa lyhyin aikavälein isäntälaitteelle. Isäntälaitte toimii verkkovirralla, joten se voi toimia taukoamatta vastaanottotilassa. Laitteissa käytettävä taajuusalue on 863 – 865 MHz, jonka käyttö on luvasta vapaata. Lähetettävän hyötydatan määräksi on arvioitu 30 B. Bittinopeudeksi on kaavailtu 50 kb/s.

Työn edetessä on tutkittava radiopiirin ominaisuuksia ja tehtävä analyyskejä niiden tarpeellisuudesta ja hyödyistä. Työssä on tutkittava myös radiolinkin kokoonpanoa sekä mitkä piirin ominaisuudet edesauttavat virransäästöä. On löydettävä keinoja, joilla tiedonsiirron varmuus saadaan todennettua. Sokkolähetys on edullisinta virransäästön näkökulmasta, mutta epävarmaa.

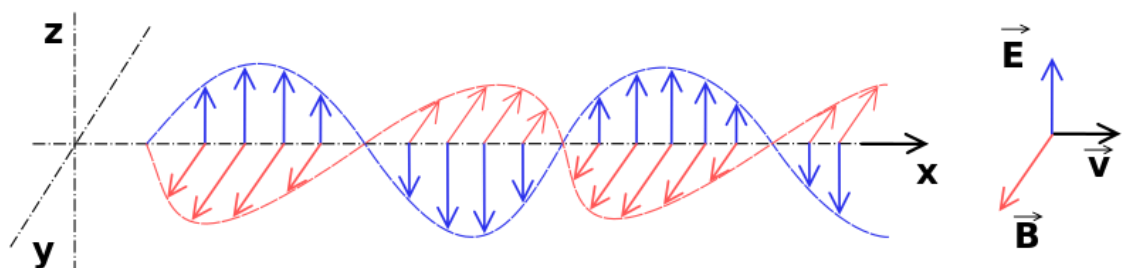
Tässä työssä ohjelmoidaan kontrolliohjelmisto kehitysalustalle C-kielellä. Lopullisessa tuotteessa käytetään erityyppistä prosessoria, jota ei käsitellä tässä työssä. Ohjelmointin haasteena on radiopiirin hallinta, joka tapahtuu SPI-väylän yhteydellä. Ennen ohjelmointiosuuden aloittamista tutustuttiin TI:n tarjoamaan esimerkkiohjelmaan [16]. Esimerkki esittää tärkeimmät funktiot, joita tarvitaan radiopiirin hallintaan. Valmiin ohjelmiston tulee kerätä anturitietoa ja lähettää tieto varmistetusti sekä energiatehokkaasti. Lähetys- sekä lepoaikojen virrankäyttö on minimoitava.

3 TIEDONSIIRTO

Laitteiden välinen tiedonsiirto tapahtuu radioaalloilla. Tässä luvussa käsitellään pinta-puolisesti radioaaltojen etenemistä, joka on tärkeä osa-alue radiolinkin muodostuksessa. On ymmärrettävä radioaaltojen käyttäytymistä erityyppisissä ympäristöissä. CC1200-radioopiiri tukee erilaisia modulaatioita, joista valitaan vaatimuksiin sopivin vaihtoehto. Modulaation jälkeen käsitellään siirtokehystä, jonka avulla tietoa saadaan siirrettyä järjestelmällisesti laitteiden välillä. Käsittelyyn sisällytetään myös SPI-väylä, joka on olennainen osa laitteen sisäistä tiedonsiirtoa.

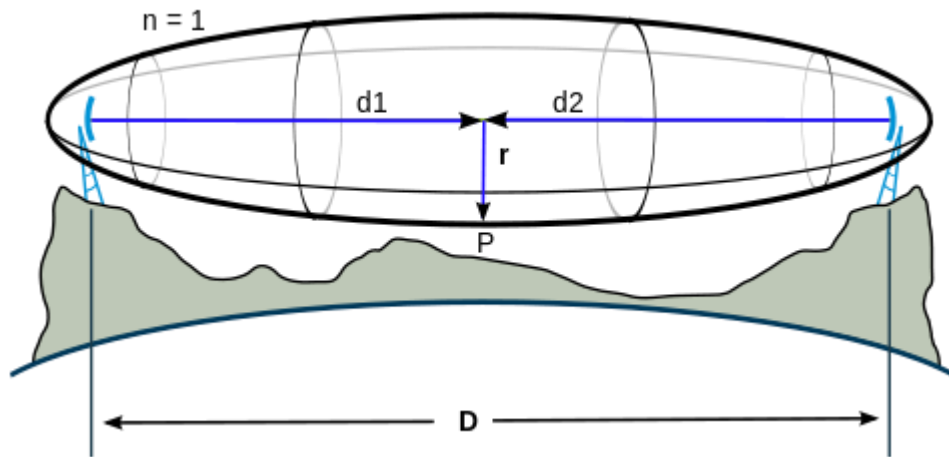
3.1 Radioaaltojen eteneminen

Radioaalto on sähkömagneettista säteilyä, samankaltaista kuin valo, ja etenee täten valonnopeudella. Radioaaltojen tapauksessa säteilyn aallonpituus on huomattavasti suurempaa. Sähkömagneettinen aalto rakentuu kahdesta elementistä, sähkö- ja magneettikentästä. Kenttien tasot ovat kohtisuorassa toisiaan sekä kulkusuuntaa vastaan. Radioaallon sähkökenttä muodostuu radiolähettimen antenniin johdetusta jännitemuutoksesta. Sähkökentän suunta eli polarisaatio on sama kuin antennin jännitteen muutoksen suunta. Ilmassa sähkökentän voimakkuus mitataan sähköpotentiaalin muutoksella tietyllä etäisyydellä, esim. V/m. Tätä mittausta käytetään, kun mitataan sähkömagneettisen kentän voimakkuutta tietyssä paikassa. Magneettikenttä muodostuu antennin virrasta. Kuten kaikki sähkömagneettiset aallot, myös radioaallot voivat heijastua, taittua tai taipua pinnoista. Pääsääntöisesti sähkö- ja magneettikentän voimakkuudet muuttuvat ajan ja paikan suhteen sinimuotoisesti ja ovat lineaarisesti polarisoituneita. Sähkömagneettisen aallon komponentit on esitetty kuvassa 1. [1]



Kuva 1. Sähkökenttä E pystytasossa ja magneettikenttä B vaakatasossa aallon edetessä vasemmalta oikealle. Sähkö- ja magneettikentät ovat aina 90° :n kulmassa toisiinsa nähden. [23]

Vastaanotettavan signaalin tulee olla riittävän voimakas, jotta vastaanotin osaa tulkita viestin. Ilmakehän signaaliin aiheuttama vaimentuma on taajuudesta riippuva, mikä on korkeammilla taajuuksilla suurempaa. Taajuusriippuvuus aiheuttaa signaalin vääristymistä etäisyyden kasvaessa. Radioaaltojen vapaan tilan vaimennus FSL (free space loss) voidaan laskea kaavalla 1. Fresnelin teorian mukaan vapaa tila muodostuu ellipsoidista kuvassa 2, mitä kutsutaan Fresnelin vyöhykkeeksi. [11]



Kuva 2. Fresnelin ellipsin muotoisen vapaan tilan vyöhyke. [21]

Ensimmäisen vyöhykkeen säde r missä tahansa pisteessä voidaan laskea kaavalla:

$$Fn = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}, \quad (1)$$

missä n = vyöhykkeen järjestysnumero, λ on aallonpituus, d_x on etäisyys antennista [21].

Kun vapaa tila on Fresnelin vyöhykkeen mukainen, voidaan vapaan tilan vaimennuksen laskentaan käyttää kaavaa:

$$FSL \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2, \quad (2)$$

missä D = antennien välinen etäisyys, ja λ on aallonpituus [11].

Radioaallon kohdatessa aallonpituuteen suhteutettuna suuri pinta, tapahtuu heijastusta. Heijastuspinnan ollessa tasainen signaali ei vääristy. Heijastuneiden aaltojen aallonpituus ja etenemisnopeus eivät muutu. Heijastuneen aallon kulma on pinnan suhteen

sama kuin tulokulman. Heijastuneen signaalin vaimennus riippuu heijastuspinnasta, jolloin osa tehosta absorboituu materiaaliin. Lukuisat materiaalit heijastavat radioaaltoja. Esimerkiksi pitkällä etäisyyksillä meri toimii yhtenä parhaista heijastuspinnista. Kuiva maa-aines, kuten aavikko on huono heijastin. Lyhyemmillä yhteyksillä varsinkin metallipintaiset rakennukset toimivat hyvinä heijastimina. [1, 11]

Radioaalloilla tapahtuu myös taittumista, samoin kuten veteen työnnetty keppi näyttää taittuneelta veden pinnalta katsottuna. Radioaallon suunta muuttuu aallon kulkiessa materiaaliin, jonka taitekerroin on eri. Radiosignaaleilla ei yleensä tapahdu äkillistä muutosta materiaalissa. On yleisempää, että muutos on asteittaista, jolloin radioaalto pikemminkin taipuu, kuin muuttaa suuntaa äkillisesti. [1, 11]

Diffraktiota eli taipumista tapahtuu, kun radioaalto osuu aallonpituutta suuremman pinnan reunaan. Radioaalto taipuu ja leviää. Diffraction ansiosta radioaalto voi siis taipua esteen tai kulman taakse varjoalueelle. On havaittu, että taipuminen on voimakkaampaa, kun esteen muoto on terävä. Matalataajuiset signaalit taipuvat paremmin kuin korkeat taajuudet. [1, 11]

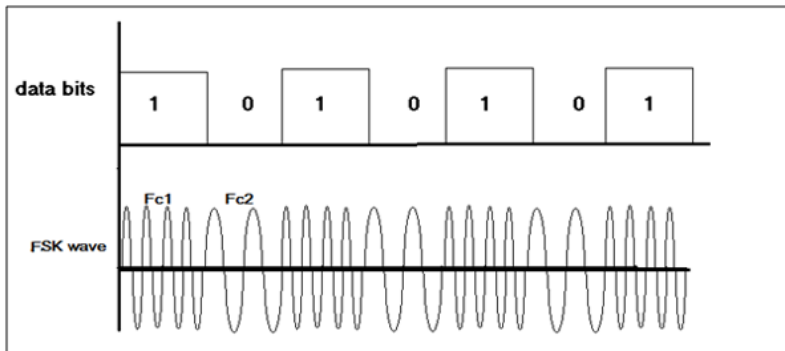
Sirontaa muodostuu radioaallon kohdatessa pinta, jonka kokoluokka on yhtä kuin aallonpituus tai pienempi. Osa radioaallon energiasta synnyttää uusia aaltoja eri suuntiin. Sironta heikentää signaalia, koska energiaa hajaantuu moneen eri suuntaan. [2]

Seurauksena kaikista radiosignaalin kohtaamista pinnoista matkalla, radiosignaali etenee vastaanottimelle useaa reittiä pitkin, mitä kutsutaan monitie-etenemiseksi. Pinnat voivat aiheuttaa heijastuksia, taittumista, taipumista sekä sirontaa. Monitie-eteneminen saattaa aiheuttaa ongelmia signaalin vastaanotossa. Heijastunut signaali kulkee pidemmän matkan kuin suoraan etenevä, eli siihen muodostuu viivettä. Eri reittejä kulkevat signaalit summautuvat toisiinsa vastaanottopisteessä. Viiveet voivat aiheuttaa virheitä signaalin tulkitsemisessä tai paikasta riippuen jopa signaalin häipymisen. Virheet aiheuttavat signaalin symbolien välisestä keskinäisvaikutuksesta, ISI (Intersymbol Interference). Viiveet aiheuttavat lähetettyjen symbolien leviämistä vastaanottimessa sekä mahdollisesti sekoittumista seuraaviin symboleihin. Vastaanottimen on hankala enää tulkita alkuperäistä symbolia, jos siihen on sekoittunut osa edellistä symbolia. [11]

3.2 Modulaatiomenetelmät

Modulaatiolla tarkoitetaan viestiä lähettävän kanta-aallon ominaisuuksien vaihtelua viestisignaalin mukaisesti. Digitaalinen bittivirta tai analoginen signaali siirretään kanta-aaltoon, jotta viesti voidaan lähettää. Moduloinnin suorittavaa kokonaisuutta kutsutaan nimellä modulaattori. Vastaanottavassa laitteessa viesti erotellaan kanta-aallosta demodulaattorilla. Molemmat operaatiot sisältyvät työssä käytettävän CC1200-radiopiirin toimintoihin.

Digitaalinen modulaatio perustuu avainnukseen (keying), jolla tarkoitetaan kanta-aallon amplitudin, vaiheen, tai taajuuden muutosta bittien tai symbolien mukaan. Viestikoodi lohkotaan tietynmittaisiksi kanavasymboleiksi. Kanavasymbolien määrä vastaa modulaattorin määrittämän kanta-aallon ominaisuuksien vaihtelun määrää. Kuvassa 3 modulaattori muuttaa kanta-aallon taajuutta viestisignaalin kahden bitin eli symbolin mukaisesti. Vastaanotossa demoduloidaan kanta-aallon taajuusvaihtelu takaisin binääriseksi viestisignaalksi.



Kuva 3. FSK-modulaation muodostaminen binääriarvoista kahdella taajuudella. [17]

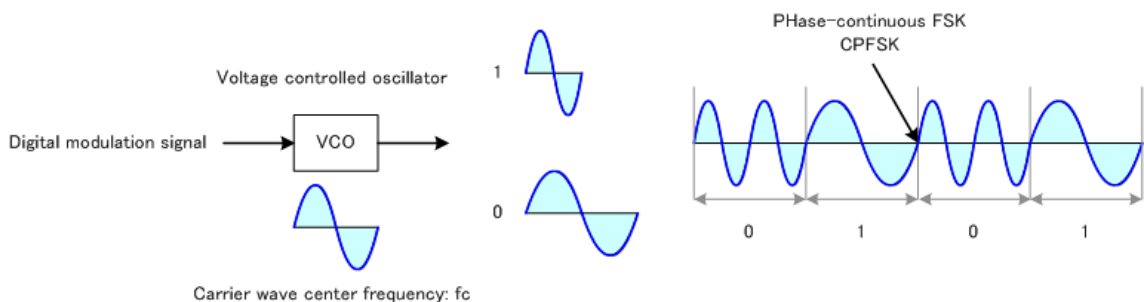
Pyrkimyksenä on käyttää mahdollisimman vähän häiriötä aiheuttavaa modulaatiotekniikkaa. Kohina sekä muut siirtokanavan häiriöt muuttavat aaltomuotoa ja vaikeuttavat siten vastaanottoa. Sopivan menetelmän valintaan vaikuttavat modulaattorin tehonkäytön tehokkuus, kaistankäytön tehokkuus ja menetelmän monimutkaisuus. Signaalin kohinasuhde määrittää vastaanotossa virheen todennäköisyyden. Tehonkäytön laskelmissa on yleisesti käytetty suhdetta E_b / N_0 , jossa E_b on yhden bitin energia ja N_0 on kohinan tehotiheys. Kaistatehokkuuden yksikkönä on b/s/Hz, millä tarkoitetaan, kuinka tehokkaasti käytetty taajuuskaista siirtää dataa. [3]

Käytetty radiopiiri CC1200 tukee seuraavia modulaatiotyypppejä: 2-FSK (Frequency Shift Keying), 2-GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying), 4-FSK, 4-GFSK, MSK (Minimum Shift Keying) ja OOK (On-Off Keying). Modulaatiotyypit FSK, GFSK ja MSK ovat taajuusmodulaatioita ja OOK on amplitudimodulaatio. [4]

3.2.1 FSK-taajuusmodulaatio

Taajuusmodulaatiossa kanta-aallon taajuutta moduloidaan viestisignaalin mukaisesti. Yksinkertaisin taajuusmodulaatio rakentuu kahdesta selvästi eri taajuudesta, jotka vastaavat binääriarvoja 0 ja 1. Tätä modulaatioita nimitetään binääriseksi FSK:ksi eli BFSK. Käytettyjen signaalien tulisi olla tahdistettuja, vaiheiden sopivasti valittuja sekä jaksollisesti viestisignaaliin synkronoituja, jotta saadaan jatkuvavaiheinen muutos symbolin vaihtuessa. Epäjatkuvuudet näkyvät aikatasossa nopeina muutoksina ja taajuustasossa kaistan leviämisenä.

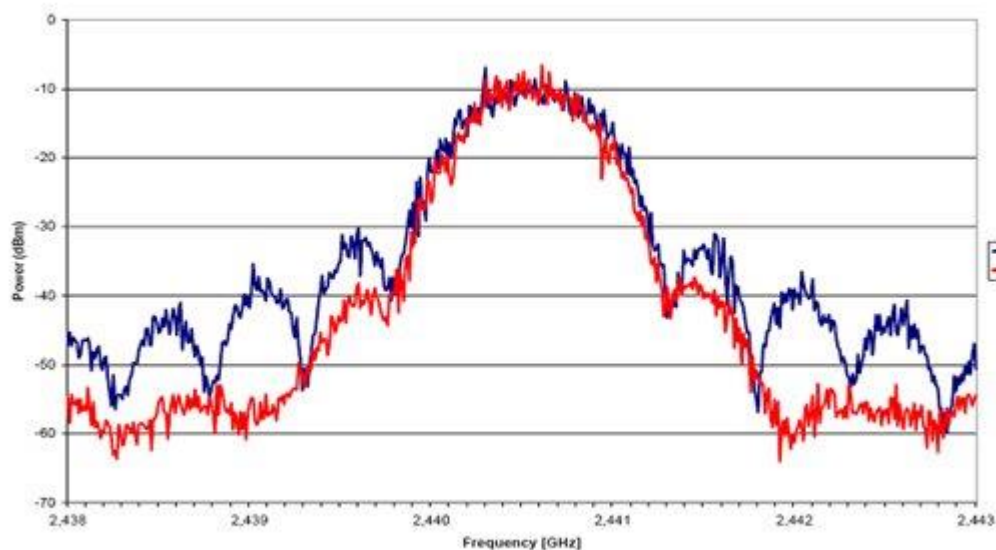
Yksinkertainen FSK-modulaattori voidaan toteuttaa kahdella oskillaattorilla ja kytkimellä, jolla valitaan taajuus bitin mukaisesti. Tuloksena saadaan signaali, jonka vaihe on epäjatkuvu, mikä aiheuttaa kaistan leviämistä. Kuvassa 4 FSK on toteutettu jänniteohjatulla oskillaattorilla, missä viestisignaalin jännitetaso muuttaa oskillaattorin taajuutta. Taajuuden vaihtuessa signaalin vaihe pysyy jatkuvana, jolloin lähete on taajuustasossa kaapeampi. [3]



Kuva 4. Jatkuvavaiheisen FSK-modulaation muodostaminen käyttäen taajuusohjattua oskillaattoria (VCO). Tuloksena saadaan jatkuvavaiheinen FSK. [18]

3.2.2 GFSK-modulaatio

GFSK on jalostettu versio FSK:sta suodattamalla datapulssit gaussin suodattimella. Suodatus tasoittaa symbolin vaihtumista, mikä kaventaa spektriä. Kapeampi spektri vähentää naapurikanavien häirintää, mutta kasvattaa ISI:n (Intersymbol Interference) vaikutusta. Kuvassa 5 on esitetty GFSK:n spektrin nopeampi vaimeneminen, jolloin teho keskittyy kaistalle paremmin. [5]



Kuva 5. FSK:n (sinisellä) ja GFSK:n (punaisella) spektrien vertailua. GFSK:n etuna on tehon parempi keskittyminen kaistalle. [22]

3.2.3 MSK-modulaatio

MSK (minimum shift keying) on jatkuvavaiheinen taajuusavainnukseen perustuva modulaatio. MSK:ssa taajuusdeviaation on oltava tasan puolet bittinopeudesta, jolloin vaihemuutoksien siirtymäaika on aina vakio. Kirjallisuudessa taajuusdeviaatiolla kuitenkin tarkoitetaan signaalien taajuuseroa keskitaajuuteen [12]. Taajuusdeviaation on siis oltava $\frac{1}{4}$ bittinopeuteen suhteutettuna. MSK:n modulaatioindeksi on aina 0,5. Taulukossa 1 on esitetty deviaatiotaajuuden vastaavuutta symbolinopeuteen. [5]

Taulukko 1. MSK-modulaatiolla taajuusdeviaation ja symbolinopeuden suhde on oltava asetuksissa $\frac{1}{4}$, jotta modulaatioindeksi on 0,5. [4]

Symbol Rate [ksps]	Frequency Deviation [kHz]	Actual Modulation Index
1.0	0.25	0.4940
1.2	0.3	0.5083
2.4	0.6	0.5083
4.8	1.2	0.5004
9.6	2.4	0.5006
19.6	4.8	0.5001
38.4	9.6	0.5007
50	12.5	0.5005
76.8	19.2	0.4997
100	25.0	0.5005
125	31.25	0.5005
250	62.5	0.5005
500	125	0.5005

3.3 IEEE 802.15.4g –standardi

Joulukuussa 2000 aloitettiin Low-Rate Wireless Personal Area Networks –standardin (LR-WPAN) kehitystyö. Kehitystyön tuloksena julkaistiin IEEE 802.15.4 –standardi. Pää-tavoitteena oli määritellä standardi yksinkertaisten ja virrankulutukseltaan vähäisten langattomien verkkojen muodostamiseen. IEEE 802.15.4 –standardin ominaisuuksia ovat luotettava tiedonsiirto, lyhyt kantama, edullisuus, pieni virrankulutus sekä yksinkertainen ja joustava protokolla. Pieni virrankulutus on saavutettu sallimalla laitteiden olevan suurimman osan toiminta-ajastaan virransäästötilassa.

Kahden tyyppiset laitteet voivat ottaa osaa LR-WPAN –verkkoon, FFD (Full Function Device) ja RFD (Reduced Function Device). FFD-laite voi toimia likiverkon (PAN) koordinaattorina, koordinaattorina tai verkkoon liitettyä laitteena. PAN-laite on verkon koordinaattori, joka on toiminnoiltaan monipuolisempi ja ohjaa muita laitteita. Se voi esimerkiksi muodostaa verkon kuuluvuusalueen laitteista. FFD-laitteet voivat keskustella RFD- ja FFD-laitteiden kanssa, mutta RFD-laitteet voivat keskustella ainoastaan FFD-laitteille. RFD-laitteen on tarkoitus olla yksinkertainen, kuten jokin mittausanturi, jolloin siirrettävän tiedon määrä pysyy vähäisenä. Pienten resurssien ansiosta valmistuskustannukset pysyvät pieninä. RFD-laite voidaan toteuttaa pienillä resursseilla ja muistikapasiteetilla.

Standardi tukee tähti- ja vertaisverkko (peer-to-peer) –topologiaa. Riippumatta topologiasta, jokaisella verkkoon liitettyllä laitteella on yksilöllinen 64-bittinen osoite. Osoitetta voidaan käyttää suoraan tiedonsiirtoon verkossa, tai se voidaan muuttaa lyhyeksi osoitteeksi laitteen liittyessä verkkoon.

Tähtitopologiassa tiedonsiirto tapahtuu laitteiden ja yhden koordinaattorin välillä. Laitteessa on yleensä jokin tietty sovellus, ja se voi toimia tietoverkon lähde- tai päätepisteenä. Koordinaattorissa voi myös olla tietty sovellus ja se voi toimia tiedon lähdepisteenä, päätepisteenä tai välittämään tietoa verkossa. PAN-koordinaattori on verkon ensisijainen kontrolleri.

Vertaisverkkotopologiassa on myös PAN-koordinaattori, mutta kaikki laitteet voivat kuitenkin kommunikoida toistensa kanssa. Vertaisverkko mahdollistaa monimutkaisten verkkojen muodostamisen. Verkko voi olla itseorganisoituva tai itsepalautuva. Se voi myös sallia useita hyppyjä siirtääkseen tietoa mistä tahansa laitteesta toiseen.

Standardi määrittelee 4 erilaista tiedonsiirtokehystä. Kehysrakenteet on suunniteltu yksinkertaiseksi säilyttäen kuitenkin hyvä häiriönsietotasoa.

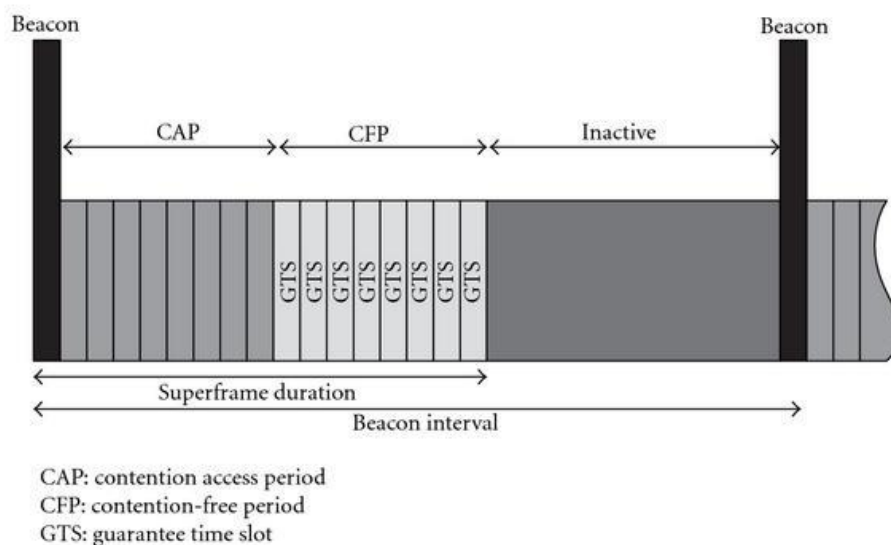
Merkkisignaalikeyksellä (beacon) on useita tehtäviä. Niiden lähettäminen on mahdollista ainoastaan FFD-laitteille. Niillä tahdistetaan laitteiden toiminta ja ne voivat sisältää ohjausta verkkoon liittymiseksi. Ne myös rajaavat superkeykset, joita käytetään kahden laitteen välisessä tiedonsiirrossa. Merkkisignaalikeyhysten käyttö on pakollista ainoastaan laitteiden kutsumisessa verkkoon.

Datakehystä käytetään kaikenlaisessa tiedonsiirrossa. Ne ovat sallittuja kaikille verkon laitteille topologiasta riippumatta. Niillä suoritetaan pääasiainen hyötykuorman siirto.

Kuittauskeyksellä tiedon vastaanottanut laite ilmoittaa, että tieto on saapunut onnistuneesti perille. Kaikissa viesteissä ei käytetä kuittausa, jolloin oletetaan, että viesti on saapunut perille ilman varmistusta. Myös kuittauskeykset ovat sallittuja kaikille verkon laitteille.

MAC-komentokeyksellä lähetetään erilaisia ohjaussanomiamia. Sanomat voivat sisältää verkonmuodostamiseen tai ylläpitoon liittyviä käskyjä. Ne ovat sallittuja kaikille verkon laitteille.

Tiedonsiirron synkronointiin voidaan käyttää valinnaista superkehystä. Se ei ole verrattavissa muihin kehysrakenteisiin. Superkehys rakentuu 16 aikavälistä joiden aikana laitteet voivat siirtää tietoa. Merkkisignaalikeyks lähetetään jokaisen superkeyksen ensimmäisessä aikavälissä. Tiedonsiirto voi tapahtua kilpavarausmenettelyllä CAP-jakson aikana, tai vaihtoehtoisesti laite voi myös pyytää taattua aikaväliä koordinaattorilta CFP-jaksolle. Superkehys voi sisältää ei-aktiivisen jakson, jolloin laitteet voivat siirtyä lepotilaan. Superkeyksen rakenne on esitetty kuvassa 6. [6]



Kuva 6. IEEE 802.15.4g superkehysjakso. [19]

3.4 SPI-väylä

SPI-väylä (Serial Peripheral Interface) on synkroninen sarjayhteys lyhyen välimatkan tiedonsiirtoon. SPI-väylällä yhdistetyt laitteet kommunikoivat kaksisuuntaisesti isäntä-renkiarkkitehtuurilla. Isäntälaitte kutsuu kirjoitus- tai lukukehyksen. Useiden renkilaitteiden tuki perustuu aktiivisen laitteiden valintaan SS-datalinjalla. Laitteet ovat aktiiviset aina kun SS-tila on matala. Jokainen renkilaitte vaatii oman SS-linjan.

SPI-väylä käyttää neljää datalinjaa, SCLK, MOSI, MISO ja SS. SCLK (Serial Clock) on kellopulssi isäntälaitteelta. MOSI (Master Output, Slave Input) on datalinja isäntälaitteelta renkilaitteelle. MISO (Master Input, Slave Output) on datalinja renkilaitteelta isäntälaitteelle.

Renkilaitteiden MOSI, MISO ja SCLK –linjat on kytketty yhteisiin pisteisiin. Renkilaitteen ulostulo on kolmitasoinen. Laitteen ollessa passiivinen ulostulo muuttuu suuri-impedansiseksi, jolloin se on loogisesti kytketty irti toisista laitteista. Kolmitasoinen ulostulo on vaatimus usean renkilaitteen kytkennässä. Kaksitasoinen ulostulo peittää muiden laitteiden yhteysmahdollisuudet.

Tiedonsiirtokehityksen alussa isäntälaitte asettaa kellotaajuuden, minkä jälkeen isäntälaitte valitsee renkilaitteen asettamalla SS-linjan 0-tasoon. Jokaisella kellopulssilla siirtyy 1 b molempiin suuntiin. Tämä tapahtuu, vaikka tiedonsiirto olisi yksisuuntainen. Yhteydessä siirretään pääsääntöisesti kahta 8-bittistä rekisteriä, yksi isäntälaitteessa ja yksi renkilaitteessa. Laitteet siirtävät eniten merkitsevän bitin samalla rekisteriä siirtäen, jolloin vastaanotettu bitti sijoittuu rekisterissä vähiten merkitsevän bitin paikalle. Rekisterit on vaihdettu, kun 8 b on siirretty. Jos tiedonsiirtoa jatketaan, rekisteriin ladataan seuraava tavu ja prosessi toistuu. Kun tiedonsiirto on valmis, isäntälaitte pysäyttää kellosignaalin ja asettaa SS-linjan tasoon 1. [13]

4 KEHITYSYMPÄRISTÖ

Ohjelmiston ja tiedonsiirron hallinnan kehitys suoritetaan TI:n tarjoamalla CC1200-kehityssarjalla (development kit). Sarja sisältää täydellisen alustan suorituskyvyn testaukseen ja ohjelmistokehitykseen. Alustaan on esiasennettu ohjelma, jolla voi suorittaa pakettivirhetestausta. Testauksen voi suorittaa erilaisilla asetuksilla, joilla voi valita lähetystehon, taajuuden sekä symbolinopeuden. Sarja sisältää 2 kpl TrxEB-emolevyjä (transceiver evaluation module), 2 kpl CC1200 EM -moduulia (evaluation module), 2 kpl antennia sekä MSP-FET430UIF -virheenkorjausmoduulin. [16]

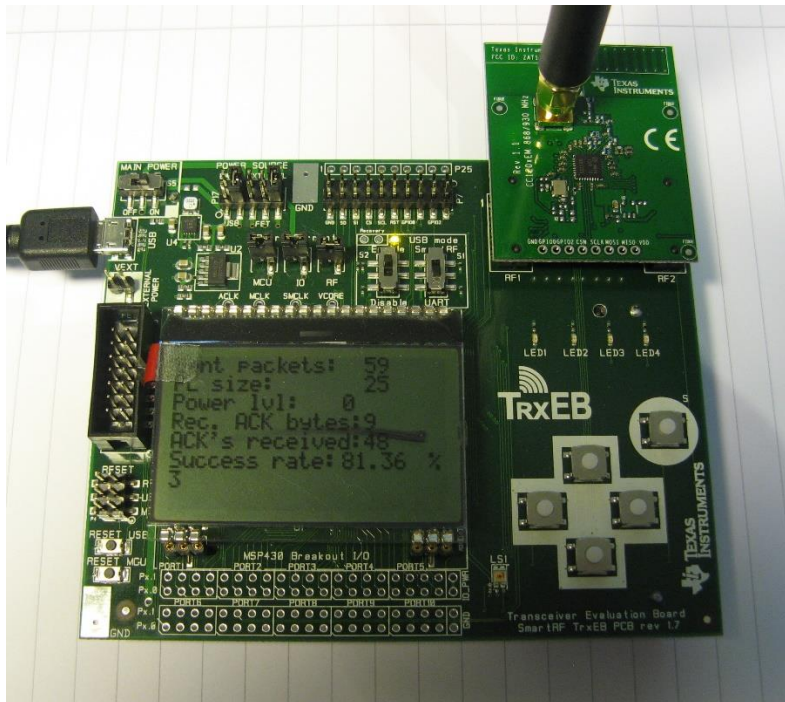
4.1 CC1200-radiopiiri

CC1200 on täysin integroitu yhden piirin lähetin-vastaanotin (transceiver). Se on suunniteltu käytettäväksi pienitehoisissa ja jännitteisissä langattomissa järjestelmissä. Kaikki tarvittavat suodattimet on sisäänrakennettu, jolloin hintavia ulkoisia suodattimia ei tarvita. CC1200 on pääasiallisesti tarkoitettu lyhyen kantaman sovelluksiin teolliselle ja tieteelliselle sektorille. Mahdolliset taajuusalueet ovat 164 – 190 MHz, 410 – 475 MHz ja 820 – 950 MHz.

CC1200 tarjoaa laitteistotason tuen pakettihallinnalle, datapuskurille, purskelähetykselle, vapaan kanavan arvioinnille, linkin laadun osoitukselle ja Wake-On-Radio -ominaisuudelle. Piirin hallintaan käytetään SPI-rajapintaa. Tyypillisesti CC1200-piiriä ohjataan mikrokontrollerilla ja lisäksi tarvitaan vain muutamia passiivikomponentteja. CC1200 on optimoitu laajakaistaisiin sovelluksiin, mutta sitä voidaan käyttää myös kaapekaistaisesti 12,5 kHz:iin saakka. [4]

4.2 SmartRF Transceiver Evaluation Board

TrxEB-emolevyn (transceiver evaluation board) avulla radiopiirin ominaisuuksien tutkiminen ja ohjelmistokehitys on tehty mutkattomaksi. TrxEB sisältää mikrokontrollerin, LCD-näytön, USB-yhteyden sekä muita hyödyllisiä ominaisuuksia, kuten LED-valoja ja kytkimiä. TrxEB:hen liitetään CC1200 evaluation -moduuli (EM), joka sisältää CC1200-radiopiirin, oheiskomponentit sekä RP-SMA -antenniliittimen. Kuvassa 7 on toimintakuntoinen TrxEB-kehitystyökalu.



Kuva 7. TrxEB-emolevy, johon on kiinnitetty evaluation-moduuli antennilla. Laite suorittaa erästä kehitysvaiheen ohjelmaa.

TrxEB:lle voidaan johtaa virta USB-kaapelilla, paristoista, virheenkorjausmoduulista, tai ulkoisesta virtalähteestä. Virtalähteen valinta tapahtuu oikosulkupaloilla. Mikrokontrolleri on 16-bittinen vähävirtainen MSP430F5438A. Mikrokontrollerin ja EM:n välinen tiedonsiirto tapahtuu käyttäen SPI-väylää. Lisäksi käytetään kahta GPIO-linjaa. TrxEB:n eri kokonaisuuksien kuluttamaa virtaa voidaan mitata erillisistä oikosulkupaloista. EB on suunniteltu käytettäväksi SmartRF Studio –ohjelmiston yhteydessä. TrxEB:n kytkimellä valitaan EM:n ohjaus joko mikrokontrollerilla tai SmartRF Studiolla USB-kaapelin välityksellä. [14]

4.3 Kehitysohjelmistot

4.3.1 SmartRF Studio

Smart RF Studio -ohjelmisto antaa käyttäjälle yleiskuvan ja lähestymistavan radiopiirin asetuksien kokoonpanoon rekisteriarvoja muokaten. Ohjelmistolla voidaan hallita radiopiiriä, minkä avulla voidaan testata eri rekisteriarvojen toimivuutta muodostamalla yh-

teys kahden EB:n välille. Rekisteriarvoja voidaan tuoda ulos ohjelmasta ohjelmistokoodiin tai Packet Snifferin rekisteritiedostoksi. Ohjelmisto toimii Windows-käyttöjärjestelmässä.

4.3.2 Packet Sniffer

Packet Sniffer on USB-liitäntäinen laite, jolla voi vastaanottaa lähetettyjä paketteja 868 ja 915 MHz alueilla. Laitteeseen voi myös ladata omia ohjelmia eri tarkoituksiin. Tässä työssä sitä käytetään helpottamaan yhteyden muodostusta seuraamalla lähetettyjä paketteja. Laite perustuu CC1111 system-on-chip -radiopiiriin, jossa on sisäänrakennettu mikrokontrolleri, flash-muisti sekä USB-ohjain. Antenni on toteutettu pintaliitospala-antennilla. Antennikomponentin yhteydessä on mikroliuska, joka virittää resonanssitaajuuden. Ympäristö vaikuttaa piirilevyllä toteutetun antennin suorituskyykyyn. Laitetta käytettäessä erilaisissa tilanteissa suorituskyykyyn muutokset ovat todennäköisiä. Laitteessa on kytkin sekä LED, jotka on yhdistetty CC1111-piiriin I/O-pinneihin. Test-liittimeen on kytketty vapaat I/O-pinnit (8 kpl). I/O-pinnejä voi käyttää virheiden hallintaan tai ohjelmallisesti asettaa suorittamaan vaadittua tehtävää.

TI tarjoaa Packet Sniffer –ohjelmiston jolla voi tarkkailla pakettien liikennettä ilmassa esimerkiksi Packet Sniffer –laitteella. Ohjelmisto tukee myös muita laitteita kuten TrxEB:tä. CC1111 vaatii muita laitteita vastaavat rekisteriasetukset, jotta vastaanotto onnistuu. SmartRF Studiossa voi muodostaa rekisteritiedoston tarvittavilla asetuksilla. Asetuksien määrittäminen vaatii aikaa, koska kahden erityyppisen radiopiiriin asetukset eroavat suurilta osin. Asetuksia voi muuttaa vastaanoton aikana mikä helpottaa oikean asetuskokonaisuuden määrittämistä. CC1111 ei tue aivan kaikkia CC1200-piiriin tukemia ominaisuuksia, kuten 802.15.4g kehysrakennetta. [7, 14]

4.3.3 IAR Embedded Workbench

IAR Systems on ruotsalainen ohjelmistoyritys, joka tarjoaa kehitystyökaluja sulautetuille järjestelmille. IAR Systems kehittää C ja C++ -kääntäjiä sekä debuggaustyökaluja 8-, 16-, sekä 32-bittisille prosessoreille. Tässä työssä käytetään Embedded Workbench –ohjelmistoa, joka sisältää C/C++ -kääntäjät ja se tukee yli 30 prosessoriperhettä. IAR Systemsin internetsivuilta on ladattavissa TI MSP430 –prosessorille räätälöity versio. Ohjelmiston voi ladata 30 päivän kokeiluversiona. [8]

5 SUUNNITTELU

5.1 CC1200-radiopiirin ominaisuuksia

Langattomassa tiedonsiirrossa on syytä tarkkailla tai varmistaa pakettien siirron onnistumista. Ilman varmistusta lähetin lähettää paketteja ilman minkäänlaista tietoa, onko pakettia vastaanotettu laisinkaan. Ongelmaan on kehitetty erilaisia tapoja, ja oikein toimissaan niiden avulla pystytään edesauttamaan pakettien perille pääsyä. Yksi tapa on lähettää aina onnistuneen paketin vastaanoton jälkeen kuittausviesti takaisin. Kuittausviestiä kutsutaan ACK:ksi (acknowledgement). Lähetyksen onnistumista voidaan edesauttaa käyttämällä esikuuntelua, jossa ennen lähetystä kuunnellaan, onko kanava vapaa. Esikuuntelusta TI käyttää nimityksiä LBT (listen before talk) tai CCA (clear channel assessment) riippuen miten ominaisuutta käytetään. Kolmas käytettävä ominaisuus on FEC, jossa dataan määrää kasvatetaan tarkoituksella. Ylimääräisten bittien ansiosta virheiden korjaus on mahdollista vastaanottopäässä. [4]

5.1.1 LBT

CC1200 –radiopiirissä on laitteistotuki automaattiselle LBT-algoritmille. Ennen lähetystä tapahtuu lyhytaikainen kuuntelujakso, jolla tarkkaillaan, onko kanava mahdollisesti vapaa. Lyhin kuunteluaika (LBT) on jakso, jonka aikana laitteisto kuuntelee vastaanotettua signaalia. Signaalitason ollessa kynnystasoa suurempi, laitteisto odottaa lisäksi lyhyen vaihtuvamittaisen aikajakson. Kuuntelujaksoja ja lyhyitä odotusaikoja jatketaan, kunnes kanava on vapaa heti kuuntelujakson alkaessa, jonka jälkeen tapahtuu viestin lähetys. Kuuntelujakson pituus on 5 ms ja vaihtuva odotusjakso on 0 – 5 ms. Kuuntelujakson kokonaisuuspituuksensa vaihtelee välillä 5 – 10 ms. CC1200-piirissä LBT asetetaan käyttöön rekisterillä CCA_MODE = 100(b). Liitteessä 1 esitetään esimerkkikoodi LBT:n käyttöönottamiseen paketin lähetystilanteessa. [4]

5.1.2 ACK-kuittausviesti

CC1200-radiopiiri voidaan asettaa lähettämään automaattinen kuittausviesti onnistuneen datapaketin vastaanoton jälkeen. Lähetettävä ACK-kuittausviesti ei muodostu automaattisesti, vaan sellainen pitää ohjelmallisesti muodostaa. ACK-paketti on kirjoitettava lähetyspuskuriin (TX FIFO) ennen kuin laite asetetaan vastaanottotilaan (RX), joten ACK-pakettiin ei voida asettaa tietoa sen vastaanottajasta osoitteen muodossa. Myös datapaketin lähetyspää voidaan asettaa siirtymään RX-tilaan heti paketin lähetyksen jälkeen, jolloin ACK-paketin vastaanotto saadaan tapahtumaan ilman erillistä komentoa. [4]

Koska ACK-pakettiin ei voida asettaa lähettäjän osoitetta, suuressa ja vilkkaassa verkossa voi mahdollisesti tapahtua virhekuittauksia. Siitä syystä ACK-paketin muodostus sekä lähetys päätettiin toteuttaa ohjelmallisesti. Onnistuneen datapaketin vastaanoton jälkeen voidaan paketin sisällöstä lukea lähettäjän osoite. Sen jälkeen muodostetaan ACK-paketti, jossa on osoitetiedot sekä mahdollisesti muuta hyödynnettävää dataa. Lyhyt viive saattaa olla tarpeen, jotta toisella laitteella on aikaa siirtyä TX-tilasta RX-tilaan. Seuraavaksi ACK-paketti voidaan lähettää, jolla kuitataan edellisen paketin onnistunut vastaanotto. ACK-pakettia odottavaan laitteeseen asetetaan aikakatkaisu, jonka sisällä se odottaa pakettia. Jos ACK-paketti ei saavu asetetun ajan kuluessa, datapaketti voidaan asettaa lähetettäväksi uudelleen. Uudelleenyrityksien suurin määrä kannattaa asettaa pieneksi paristokäyttöisellä laitteella. Lähetysyrityksien välille muodostetaan lyhyt vaihtuvamittainen viive, jolla saadaan erotettua samanaikaiset lähetykset. Viiveen tulisi olla vähintään yhden paketin vastaanottoon sekä kuittaukseen kuluvan aikajakson pituinen, jotta vastaanottava laite ehtii palautua RX-tilaan ennen viestin uudelleenlähetytystä.

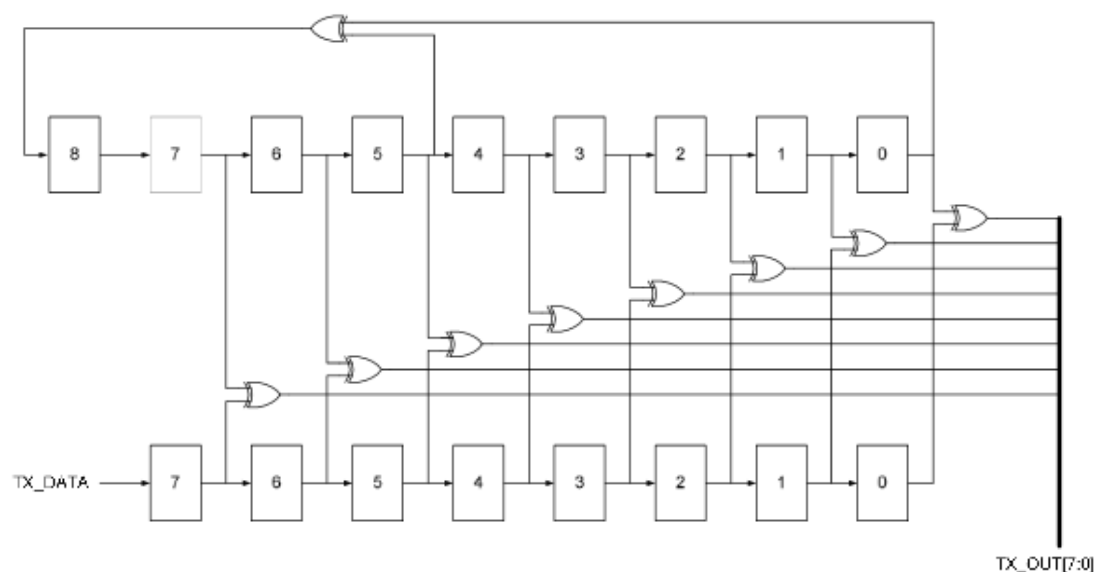
5.1.3 FEC-virheenkorjaus

FEC-virheenkorjaus (Forward Error Correction) mahdollistaa vioittuneen paketin korjauksen lisäämällä dataan ylimääräisiä bittejä [4]. Virheenkorjauksen käyttö näkyy lähetyksajan pitenemisenä ja siten lähetykseen sekä vastaanottoon käytetään enemmän energiaa. Saatava hyöty tulee esille vaikeassa olosuhteessa, jossa signaalin taso on vastaanottimen herkkyyden rajalla. FEC:in toimintaa kokeiltiin käytännössä asettamalla

lähetysteho matalaksi ja tarkkailemalla vastaanottimen ilmoittamaa RSSI (Received Signal Strength Indicator) lukemaa. Virheenkorjauksella saatiin 2 – 3 dB:n kohennus herkkyyteen. FEC onnistui korjaamaan vastaanotettuja virheellisiä paketteja virheettömiksi. Virheenkorjauksen lisäämää datamäärää arvioitiin mittaamalla paketin lähetykseen kuluva aika. Ilman virheenkorjausta 30 B paketin lähetyksajaksi mitattiin 6,4 ms (kuvassa 11). FEC:iä käytettäessä saman pituisen paketin lähetykseen käytettävä aika mitattiin olevan 11,6 ms. Suhteutettuna FEC kasvattaa virrankulutusta jopa 81 %. Paristokäytössä laitteessa sitä ei ole järkevää käyttää. Huonoissa olosuhteissa herkkyytason rajalla sen käyttö voisi olla valinnaista erikseen kytkettäessä.

5.1.4 Spektrin tasoitus

Usein radioteitse lähetettävä binäärinen data sisältää pitkiä peräkkäisiä 1- tai 0-arvoja aiheuttaen epätasaisuutta spektrissä. Kuitenkin ennen lähetystä data voidaan käsitellä satunnaistamalla, joka tasoittaa spektriä. Spektriä tasoittavan ominaisuuden nimi on *whitening*. Data ei ole puhtaasti satunnaista, vaan paremminkin satunnaisten kaltaista. Tasainen spektri kasvattaa suorituskykyä ja helpottaa vastaanottimen toimintaa. Vastaanottimessa on suoritettava sama operaatio, jotta viesti voidaan tulkita oikein. Synkronoitavuja ei tasoiteta, jotta niiden tunnistus onnistuu tasaisen kohinan yli. Tasoitus tehdään menetelmällä, jossa jokaiselle tavulle suoritetaan ehdoton-tai (XOR) operaatio valesatunnaissarjalla. Operaation piirikaavio on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Datán käsittely XOR-sarjalla. [10]

Tuloksena lähetettävä data on satunnaisen kaltaista sekä DC-vapaata, datan määrä ei lisäännä. Tasoittamisella on myös vaikutusta tietoturvaan. Tavallaan tasoitus tekee datasta koodattua, jota ei pysty purkamaan ilman käänteisoperaatiota. [10]

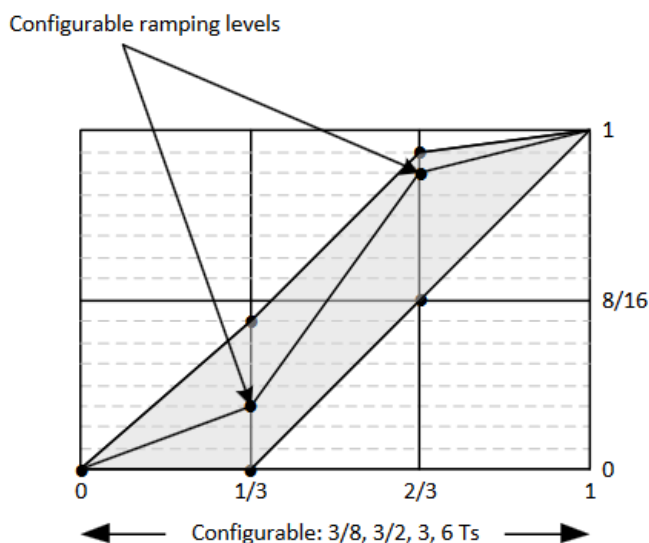
5.1.5 Manchester-koodaus

Manchester-koodauksessa symboli vaihtuu jokaisen bittijakson keskellä. Bitin arvolla 1 tila vaihtuu $\{1,0\}$ sekä bitin arvolla 0 tila vaihtuu $\{0,1\}$. Koodausta voidaan käyttää myös invertoituna. Koodauksella saadaan aikaan muuttuva bittivirta, vaikka peräkkäiset symbolit olisivat samoja. Vastaanottimen on helpompi havaita kellopulssi jatkuvasti vaihtelevasta bittivirrasta. Haittapuolena Manchester-koodauksessa on lisääntyneiden tilanvaihtojen myötä kaistankäytön kaksinkertaistuminen, jota seuraa maksimi symbolinopeuden alentuma. Manchester koodauksen käyttö FSK:n yhteydessä ei tuo merkittävää etua, sillä koodauksen aiheuttaman spektrin tasoittumisen voi tehdä myös edellä selostetulla tavalla kaistaa levittämättä. [4]

5.1.6 Tehoramppi

Äkilliset muutokset lähetystehossa aiheuttavat hetkellistä spektrin leviämistä, jolloin kaistan ulkopuolinen teho voi aiheuttaa häiriöitä tiedonsiirrossa. Lähetystehon liuskamaista muutosta (PA ramping) käytetään parantamaan spektritehokkuutta lähetyksen alussa sekä lopussa. Tehorampin kesto on asetettavissa $3/8$, $3/2$, 3 tai 6 symbolin pituiseksi, jonka aikana tapahtuu tehon muutos 0:sta asetettuun lopullistehoon kahden pisteen kautta. Tehoramppi on esitetty kuvassa 10.

Tehoramppi on jaettu 16 mahdolliseen tasoon. Ensimmäinen piste voidaan asettaa tasolle 0 – 7 ja toinen piste tasolle 0,5 – 16. [4] Tehorampin oletusasetus on kuvan 10 mukainen, jossa muutos tapahtuu 3 symbolin aikana. Tehoramppiin käytetyt symbolit eivät lukeudu erikseen asetettuun alukkeen pituuteen. Lähetyksen symbolilukumäärä siis kasvaa tehoramppiin käytettyjen symbolien lukumäärällä. [4]



Kuva 9. Tehorampin säätöalue. Tehon muutos tapahtuu oletuksena kuvan mukaisesti lähetyksen aloitus- sekä lopetusvaiheessa. [4]

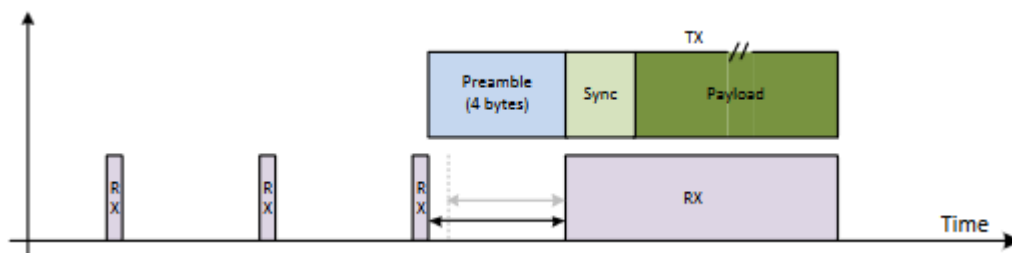
5.1.7 Wake on Radio

Wake on Radio -ominaisuuden avulla laite voi siirtyä SLEEP-tilasta RX-tilaan jaksollisesti ilman prosessorin vuorovaikutusta. WoR-tilaan siirrytään syöttämällä komento SWOR. Laite siirtyy SLEEP-tilaan SPI-yhteyden CS-tilan muuttuessa $\{0,1\}$. Radiopiirin ajastin siirtää laitteen RX-tilaan asetetuksi aikajaksoksi, josta se palautuu takaisin SLEEP-tilaan. Jos RX-tilan aikana vastaanotetaan paketti, tieto siitä voidaan ilmoittaa prosessorille käyttämällä GPIO-pinniä. Paketti on luettava ennen siirtymistä takaisin WoR-tilaan, sillä lepotilassa FIFO-rekisterit tyhjenevät. [4]

5.1.8 RX Sniff Mode

RX Sniff Mode on kehitetty varsinkin paristokäyttöisiin sovelluksiin. Se on uudenlainen ominaisuus, jolla tarkkaillaan autonomisesti RF-aktiivisuutta pienitehoisella algoritmilla. CC1200-radiopiiri on suunniteltu todella nopeille tilanvaihdolle, jolloin vastaanotinta voidaan kytkeä nopeasti. RF-aktiiviteetin nopealla ja lyhytaikaisella analyysillä saavutetaan alhainen virrankulutus. RX Sniff Mode on hyödyllinen tilanteissa, joissa ei tiedetä paketin lähetyssajankohtaa.

Ominaisuus perustuu siihen, että paketin vastaanotto ei tarvitse alukkeen täydellistä vastaanottamista. Kuuntelujen aikaväli voi olla esimerkiksi 4 B alukkeen pituinen, jolloin vastaanotin asetetaan tunnistamaan 16 b:n synkronointitavusta 11 b. Synkronointitavun 5 eniten merkitsevää bittiä (MSB) riittävät AGC:n (automatic gain control) asettumiseen, eikä aluketta tarvitse vastaanottaa. Tilanne on esitetty kuvassa 10. Keskimääräinen virrankulutus on vain 8 μ A: a nopeudella 50 kb/s, kun piirin käyttöjännite on 3,0 V. [9]. [4]



Kuva 10. RX Sniff Mode -kuunteluväli alukkeen pituisilla jaksoilla. [4]

Arvioidaan virrankulutusta RX Sniff Modea käyttäen tilanteessa, jossa anturitietoa lähettävä laite kuuntelee isäntälaitteelta lähetettävää mittauspyyntöä 30 s välein. Kiteiden epätarkkuuksien vuoksi kuunteluajan vaatimukseksi voidaan arvioida 3 s, jolloin jäljelle jäävät 27 s laite on lepotilassa. Oletetaan että laite vastaanottaa paketin 1,5 s:n kuluttua ja lähettää sen jälkeen mittausdataa, joka kuitataan ACK-viestillä. Pitkän alukkeen ansiosta RX-tilojen välit saadaan hyödynnettyä lepotilassa virtaa säästäen. Virrankulutus RX Sniff Modessa on ilmoitettu olevan 2,1 mA nopeudella 50 kb/s ja 24 B:n alukkeella. Käyttäen taulukossa 2 esitettyjä virrankulutus sekä lähetys- ja vastaanottoaikoja voidaan laskea keskimääräinen virrankulutus vuositasolla RX Sniff Modelle. Laskennallinen arvio virrankulutukselle on yli 1000 mA 30 s lähetysvälein. Verraten taulukossa 3 esitettyihin virrankulutuksen arvioihin huomataan, ettei RX Sniff Mode ole tässä tilanteessa käytännöllinen ominaisuus.

5.1.9 Kanavasuodatin

Kanavasuodattimen kaistanleveys (RX filter BW) on tärkeä radiopiiriin asetus. Sitä tarvitaan vastaanottotilassa kanavan ulkopuolisten signaalien ja kohinatehon suodatuksen. Se on asetettavissa 9,5 – 1 600 kHz:n kaistalle. Kanavasuodatin on keskitetty välitaajuuteen (IF). Kanavan kaistanleveyteen vaikuttavat käytetty modulaatio, bittinopeus sekä

FSK:n yhteydessä taajuusdeviaatio. Kaistanleveyttä (BW) voidaan arvioida Carsonin säännön avulla. Carsonin sääntö johdettuna FSK-signaalille on:

$$BW(\text{FSK}) \approx 2 \left(\frac{h}{2T_s} + \frac{1}{2T_s} \right) = \frac{h+1}{T_s}, \quad (3)$$

missä h on modulaatioindeksi, ja T_s on bitin jakson pituus eli $T_s = \frac{1}{\text{bittinopeus}}$. Modulaatioindeksi h voidaan laskea kaavalla:

$$h \equiv \text{taajuusdeviaatio} \times \frac{2}{\text{bittinopeus}}, \quad (4)$$

missä taajuusdeviaatio on taajuusero keskitaajuuteen.

Lasketaan arvio signaalin kaistanleveydelle, kun bittinopeus on 50 kb/s, sekä taajuusdeviaatio on 25 kHz. Kaavan 3 avulla laskettuna modulaatioindeksi $h = 1$, jota käyttäen kaavassa 4, kaistanleveyden arvioksi saadaan 100 kHz. GFSK-modulaation kaistanleveys on jonkin verran Carsonin säännön avulla arvioitua kapeampi [22]. Tarkempi kaistanleveys voidaan määrittää spektrianalysointorilla mittaamalla kanavan 99 % tehollinen kaistanleveys. Lähettimissä sekä vastaanottimissa saattaa kuitenkin tapahtua taajuuspoikkeamaa esimerkiksi lämpötilan muutoksen ja kiteen epävakauden vaikutuksesta. Taajuuspoikkeama aiheuttaa signaalin keskitaajuuden siirtymistä. Jos käytetään liian kapeakaistaista suodatusta, suuri osa signaalin hyötytehosta saattaa suodattua. SmartRF Studion esimerkkiasetuksissa edellä mainitussa tilanteessa kanavasuodatin on asetettu arvoon 104,2 kHz, joka on laskennallista kaistanleveyttä suurempi sallien mahdolliset taajuuspoikkeamat. Kapeammalla kanavasuodatuksella voidaan kuitenkin saavuttaa parempi herkkyys, joten suunnittelijan tehtävä on löytää optimaaliset asetukset. Tässä työssä käytetään SmartRF Studion tarjoamaa laskelmoitua arvoa, joka on mainittu edellä. [12]

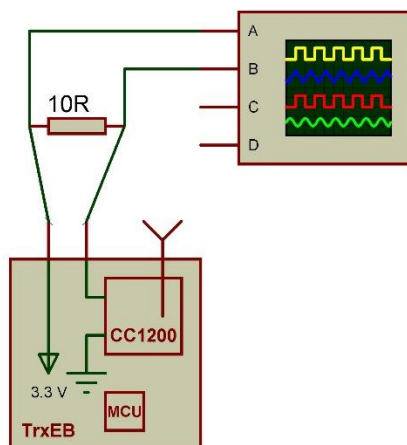
5.2 Virrankulutus

Valmistaja on ilmoittanut virrankulutuksen datalehdellä. Virrankulutus on ilmoitettu kaikissa mahdollisissa piirin tiloissa sekä eri lähetystehoilla. Lähetys- sekä vastaanottotilan virrankulutuksia mitataan ja niitä verrataan valmistajan ilmoittamiin lukemiin. Mittauksien perusteella tehdään arviolaskelma virrankulutuksesta erilaisissa tilanteissa.

Ennen kuin lähettimen virrankulutusta voidaan arvioida, tulee tietää, mitä lähetyksen aikana tapahtuu. Lähetyksen ei muodostu pelkästään lähetettävästä hyötydatasta, vaan siihen lukeutuu lisäksi vastaanottamisen mahdollistavia aluke- ja synkronointitavuja sekä CRC-dataa (cyclic redundancy check). Oletuksena synkronointisana on 4 B eli 32 b [4]. Aluke puolestaan on 3 B eli 24 b. Lähetettävän datan määrä oletuksena on siis 37 B, kun hyötydatan määrä on 30 B [4]. Datalehti ilmoittaa 10 dBm:n teholla virrankulutukseksi 36 mA, kun käyttöjännite on 3,0 V. 37 B:n lähettämiseen nopeudella 50 kb/s kuluisi aikaa 6 ms binääristä kanavakoodausta käyttäen. Lyhytaikaisista purskeista huolimatta virrankulutus on vuositasolla merkityksellinen. Lähetyksien väliajat piiri voidaan kytkeä lepotilaan, jonka aikana virrankulutus on alle 1 μ A [9].

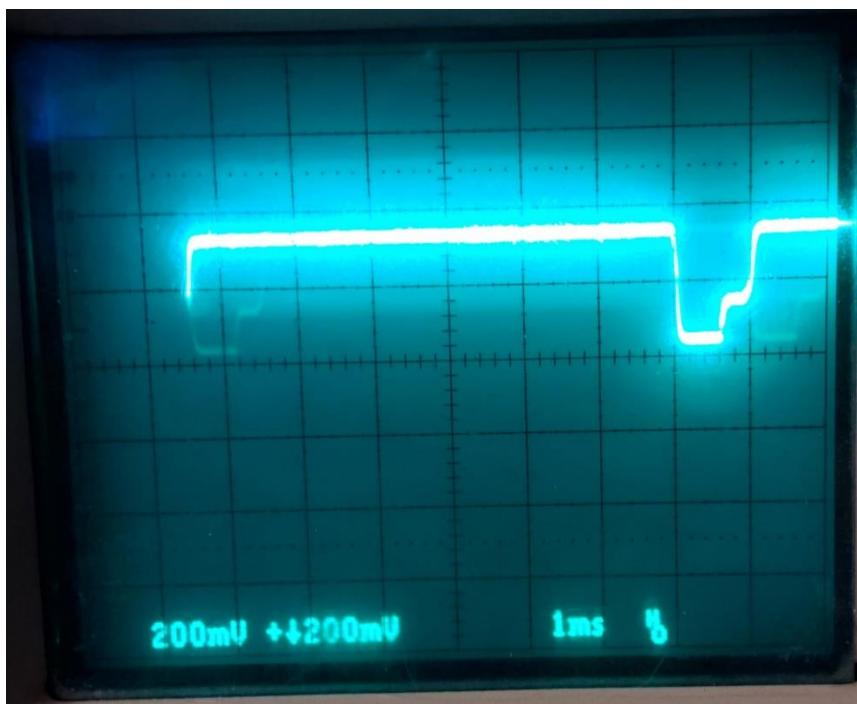
5.2.1 Virrankulutusmittaukset

Lähetykseen kulunut aika sekä virta määritettiin oskilloskoopilla mittaamalla jännitettä tunnetun vastuksen yli. Mittausjärjestely on esitetty kuvassa 11. Vastuksen resistanssi on 10 Ω . Vastus on kiinnitetty virtamittauksiin tarkoitetun jumpperin tilalle, jolloin vastus on sarjakytkettynä radiopiirin kanssa.



Kuva 11. Virrankulutuksen mittausjärjestely.

Radiopiiri on ohjelmoitu lähettämään 30 B:n hyötydataa toistuvasti 10 dBm:n teholla. Hyötydatan lisäksi lähetykseen lukeutuu 3 B aluketta, 2 B synkronointisanaa, sekä 2 B CRC-dataa. Lähetyksen spektrin tasoitus (whitening) on käytössä. Mittaus on esitetty kuvassa 12. Keskellä tasainen jännitetaso kuvaa lähetysvaihetta, jonka jälkeen tulee lyhyen lepotilan aiheuttama notkahdus.



Kuva 12. Oskilloskooppikuva jatkuvasta 30-tavuisen paketin lähetyksestä 10 dBm teholla. Jännite on mitattu 10 Ω sarjavastuksen yli.

Kynnys ennen lähetystilaan siirtymistä muodostuu tietoa ladattaessa lähetyspuskuriin ja piirin valmistautuessa lähetykseen. Kuvassa yksi ruutu vastaa 200 mV:n jännitettä sekä 1 ms:n aikajaksoa. Aikaa kuluu 30-tavuisen paketin lähetykseen 6,4 ms, josta laskettuna bittinopeus on 46 kb/s. Jännitetaso 10 Ω sarjavastuksen yli on 330 mV, joista laskettuna virta on 33 mA. Jännite vastuksen yli on tuolloin 0,33 V, jolloin piirin käyttöjännite on noin 3,0 V lähetyksen aikana.

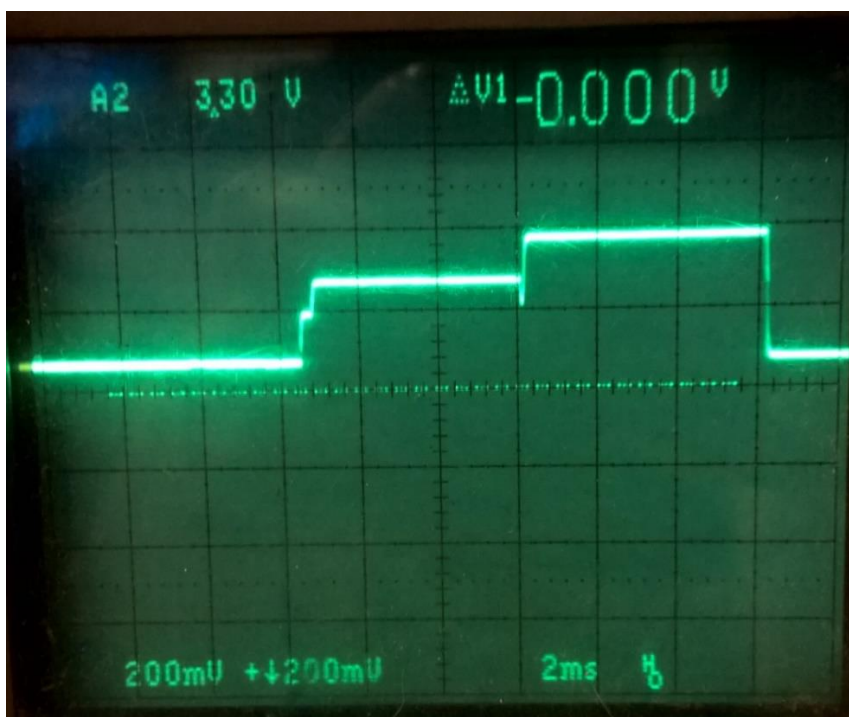
Taulukossa 2 on arvioitu laskennallisesti virrankulutusta erilaisilla lähetysväleillä. Paristoksi on valittu tässä esimerkissä 1300 mAh, jonka kapasiteetissa on huomioitu mahdollinen 15 %:n itsepurkaus. Taulukossa ei ole huomioitu mikrokontrollerin virtaa. Lähetysvälit määräävät käytännössä virrankulutuksen, jolloin lepotila on lähes merkityksetön.

Luotettavamman tiedonsiirron varmistamiseksi lähettämistä kokeiltiin LBT-ominaisuudella, jossa kanavaa kuunnellaan ennen paketin lähettämistä. Kuvassa 13 näkyy, kuinka RX aktivoituu 5 ms:n ajaksi ennen lähetystä.

Taulukko 2. Radiopiirin virrankulutusta sekä pariston kestoä arvioitu vuositasolla.

TX aika (s)	TX (mA)	Lepotila (mA)	Paristo (mAh)	Itsepurkaus (%)	Kapasiteetti
0,0064	34	0,001	1300	15	<u>1105</u>

TX välit (s)	Aika TX-tilassa (h)			Virtaa kulunut (mA)			Pariston kesto (a)
	päivässä	kuukaudessa	vuodessa	päivässä	kuukaudessa	vuodessa	
2	0,077	2,304	27,648	2,64	79,05	948,64	1,2
5	0,031	0,922	11,059	1,07	32,05	384,64	2,9
10	0,015	0,461	5,53	0,55	16,39	196,64	5,6
30	0,005	0,154	1,843	0,2	5,94	71,31	15,5

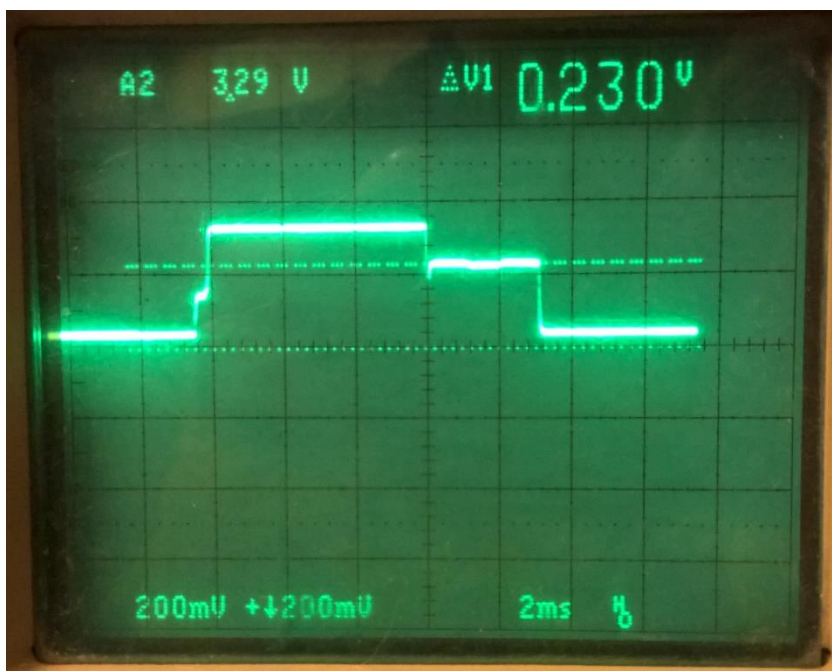


Kuva 13. Oskilloskooppikuva paketin lähettämisestä LBT:tä käyttäen. Jännite on mitattu 10 Ω :n sarjavastuksen yli.

RX-tilassa virrankulutukseksi mitattiin 28 mA. LBT:n käyttö 30 B:n paketilla lisää virrankulutusta yli 60 %. Lähetyksiä suoritetaan bittinopeuteen ja määrään suhteutettuna harvoin, jolloin lähettimen käyttöaste jää alle prosentin kymmenyksen. LBT:n käyttö paristokäyttöisessä laitteessa ei ole hyödyksi tilanteessa, jossa yhteentörmäyksen todennäköisyys on pieni. Sillä ei voida tarkkailla lähetetyn paketin vastaanottoa, mikä on luotettavuuden kannalta hyödyllinen ominaisuus.

Seuraavaksi tarkasteltiin tilannetta, jossa datapaketin vastaanottanut laite lähettää ACK-paketin takaisin ilman LBT:n käyttöä. ACK-paketti saa olla pieni, vain muutaman tavun mittainen. Sillä ainoastaan kuitataan onnistunut vastaanotto sekä tehdään asetusten muutoksia tarvittaessa. Kuva 14 esittää, kuinka vastaanotin aktivoituu datapaketin lähetyksen jälkeen.

Ideaalitulanteessa ACK-paketti voidaan vastaanottaa heti kunnes lähetyspää on ehtinyt viestin vastaanoton jälkeen muodostamaan sekä lähettämään sen. Tilojen vaihtumiset ja paketin muodostaminen viivästyttävät ACK-paketin saapumista. Viive esiintyy suhteellisen pitkänä RX-tilan jatkumisena 3 B:n paketille, mikä kuvan 14 mittauksessa on noin 3 ms. Ajoittaiset virheet tai häiriöt voivat aiheuttaa ongelmia datapaketin tai ACK-paketin siirrossa kasvattaen virrankulutusta, kun viestipaketti lähetetään mahdollisesti useaan kertaan.



Kuva 14. Lähetystä seuraa ACK-paketin odotus sekä vastaanotto. Jännite on mitattu 10 Ω sarjavastuksen yli.

5.2.2 Virrankulutuksen arviointi

Virtamittauksien perusteella muodostettiin taulukko, jossa vertaillaan ACK- ja LBT-tekniikoita virrankulutuksen osalta. Taulukossa 3 on käytetty taulukon 2 tietoja TX-virran laskemiseksi.

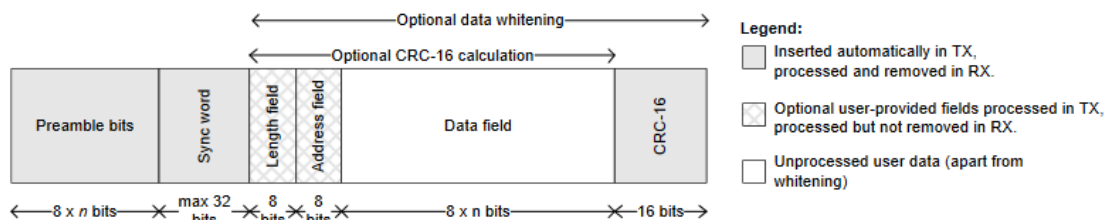
Taulukko 3. Virtalaskelma eri lähetysväleillä ACK- ja LBT-tekniikoilla.

TX välit (s)	RX aika LBT:llä (h)			Kulunut virta (TX + LBT) (mA)			Yhteensä
	päivässä	kuukaudessa	vuodessa	päivässä	kuukaudessa	vuodessa	TX + LBT (mA/v)
2	0,06	1,80	21,60	4,08	122,25	1467,02	1488,62
5	0,02	0,72	8,64	1,64	49,33	591,99	600,63
10	0,01	0,36	4,32	0,83	25,03	300,32	304,64
30	0,00	0,12	1,44	0,29	8,82	105,87	107,31
TX välit (s)	RX aika ACK:lla (h)			Kulunut virta (TX + ACK) (mA)			Yhteensä
	päivässä	kuukaudessa	vuodessa	päivässä	kuukaudessa	vuodessa	TX + ACK (mA/v)
2	0,04	1,08	12,96	3,50	104,97	1259,67	1272,63
5	0,01	0,43	5,18	1,41	42,42	509,05	514,24
10	0,01	0,22	2,59	0,72	21,57	258,85	261,44
30	0,00	0,07	0,86	0,26	7,67	92,04	92,91

Taulukossa oletetaan ideaalitilanne, jossa jokainen paketti vastaanotetaan virheettömästi eikä tapahdu uudelleenlähetystsiä ja -kuunteluita. Laskemien perusteella todettiin, että ACK-kuitausviestien käyttö on edullisempi tapa varmistaa tiedonsiirron onnistuminen. Ero virrankulutuksessa on vuositasolla jopa 17 %:a ACK:n eduksi. Lisäksi ACK-paketissa voidaan siirtää hyödyllistä dataa. Näistä syistä järjestelmässä päädyttiin käyttämään ACK-paketilla kuitattavaa tiedonsiirtoa.

5.3 Standardi kehysrakenne CC1200-radiopiirillä

CC1200 tukee kahta kehysrakennetta. Standardi kehysrakenne on kuvan 15 mukainen. Sen pääosat ovat aluke, synkronointisana, pituus- sekä osoitekentät, hyötydata ja CRC-data. Osa kentistä on valinnaisia, jolloin lähetettävän tiedon määrää saadaan kaivennettua tarvittaessa tai olosuhteiden salliessa. Toinen tuettu kehysrakenne on IEEE 802.15.4g –standardin mukainen.



Kuva 15. CC1200-piirin oletuksen mukainen kehysrakenne. [4]

5.3.1 Synkronointitavut

Datapakettia lähetettäessä aloitetaan alukkeella, jota voisi kuvailla esipuheena tai johdantona. Sen on tarkoitus toimia vastaanottimelle herätteenä, jolla tuleva viesti saadaan erottumaan kohinasta. Vastaanottimen AGC asettuu alukkeen tehoon. Aluke on jokin jatkuva bittikuvio, kuten 1010, jota toistetaan rekisteriin asetetun määrän mukaisesti. Sen pituus on oletuksena 3 B, mutta voidaan asettaa 0 – 30 B:n pituiseksi. Alukkeen minimipituudeksi on ilmoitettu 4 b [9]. Digitaalinen demodulaatio ei vaadi alukkeen käyttöä, mutta sitä tulee käyttää tehorampin tai RX Sniff Moden yhteydessä.

Alukekenttää seuraa synkronointisana, jota käytetään vastaanottimen tahdistumiseen. Synkronointisanan tunnistus vastaanottimessa on toteutettu jatkuvalla synkronointisanan hakemisella korrelaation avulla. Synkronointisana voidaan asettaa 11, 16, 18, 24 tai 32 b:n pituiseksi. Lähetysvaiheessa modulaattori lisää synkronointisanan automaattisesti paketin alkuun. Synkronointisanan tulee olla asetettu kaikkiin verkon laitteisiin yhtäläiseksi, sillä vastaanottotilassa demodulaattori käyttää synkronointisanaa hyötydatan aloitusmerkkinä. CC1200 laskee jatkuvasti synkronointisanan arvoa erottaakseen sen taustakohinasta. Arvo on luettavissa rekisteristä. Kun vastaanotin havaitsee synkronointisanan riittävän hyvin, demodulaattori aloittaa paketin tulkitsemisen. CC1200 tukee myös kaksoissynkronointia (DualSync), jossa käytetään kahta erilaista 16-bittistä sanaa. Vastaanotin hakee samanaikaisesti molempia sanoja, joista toisen löytyessä vastaanotto aloitetaan. [4]

5.3.2 Data-alue

Synkronointisanan jälkeen alkava hyötydata voi sisältää paketinhallintaan liittyvää informaatiota. Jos käytetään vaihtuvaa paketin pituutta, pitää ensimmäisen tavun muodostavan 8 b merkitä paketin pituus. Paketin pituus voi olla myös kiinteä, jolloin pituus on asetettava rekisteriin PKT_LEN. Kiinteämittaisen paketin pituutta ei tarvitse ilmoittaa paketin alussa. Jos vastaanotettu paketti on suurempi kuin rekisterissä tai paketissa ilmoitettu, se hylätään automaattisesti.

Valinnaisesti vastaanotettuja paketteja voidaan suodattaa osoitekentän avulla, jolle on varattu paketin toinen tavu. Osoitetavu ei muodostu automaattisesti, vaan siihen kirjoite-

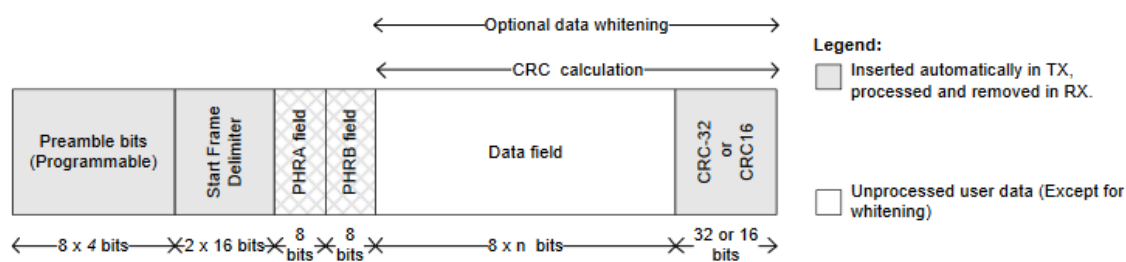
taan ohjelmallisesti. Laitteen rekisteriin DEV_ADDR voidaan asettaa myös osoite (8-bit-tinen), jolla vastaanotin saadaan hylkäämään paketit, joissa on eri osoitetavu. Osoitekenttää voidaan käyttää myös laitteiden yksilöintiin ilman osoitesuodatusta. Osoitekenttä lukeutuu paketin pituuslukemaan. [4]

5.3.3 CRC-laskentatulos

Data-alueen jälkeinen 16 b on CRC-laskentatulos (cyclic redundancy check). Lähetin soveltaa 16-bittistä polynomia lähetettävään dataan, johon liitetään tuloksena saatu CRC-koodi. Vastaanotin myös soveltaa samaa 16-bittistä polynomia saamaansa dataan ja vertaa sitä lähettimen tulokseen. Jos CRC-tulos ei täsmää, piiri voidaan asettaa hylkäämään kyseinen paketti ja siirtyä RX-tilaan odottamaan uutta pakettia. Myös CRC-kenttä on vaihtoehtoinen ja voidaan poistaa käytöstä rekisterillä CRC_CFG. [4]

5.4 802.15.4g tuki

CC1200-piirissä on laitteistotuki 802.15.4g-standardille. Tuki saadaan käyttöön rekisteriasetuksella, jolloin kaikki muut pakettihallinta-asetukset hylätään. 802.15.4g-kehys eroaa hieman aikaisemmin esitetystä oletuskehyksestä. Kun 802.15.4g-standardimuotoista pakettia lähetetään, sen on oltava kuvan 16 mukainen. Tavun mittaisten PHRA ja PHRB kenttien rakenne on esitetty kuvassa 17.



Kuva 16. CC1200 –piirin tukema 802.15.4g-kehysrakenne. [4]

	PHRA[7]	PHRA[6:5]	PHRA[4]	PHRA[3]	PHRA[2:0]: PHRB[7:0]
	PHR[15]	PHR[14:13]	PHR[12]	PHR[11]	PHR[10:0]
Bit String Index	0	1 - 2	3	4	5 - 15
Bit Mapping	MS	$R_1 - R_0$	FCS	DW	$L_{10} - L_0$
Field Name	Mode switch	Reserved	FCS type	Data whitening	Frame length

Kuva 17. PHR-kenttien rakenne 802.15.4g kehyksessä. [4]

PHRA/B-kentät on kirjoitettava ohjelmallisesti TX FIFO:oon. Kentissä määritellään spektrin tasoitus, virheentunnistus kehyspituus sekä mahdollisesti tilanvaihtokäskyjen yhteydessä virheenkorjaus (FEC). Tilanvaihto ei ole laitteistotasolla tuettu, vaan pitää suorittaa ohjelmallisesti. Rekisterillä PKT_CFG_APPEND_STATUS saadaan linkin laatu (LQI), signaalin vahvuuden ilmaisin (RSSI) sekä virheentunnistuksen tulos (CRC) lisättyä automaattisesti vastaanotossa RX FIFO:oon. 802.15.4g:n yhteydessä voidaan käyttää myös virheenkorjausta (FEC), jonka yhteydessä on käytettävä kaksoissynkronoin-tisanan tunnistusta (DualSync). [4]

5.5 Hyväksytty kokoonpano

Modulaatiovaihtoehdoista käyttöön valittiin 2-GFSK. Sen etuna on FSK modulaatioon verrattuna naapurikanavien häiritsemättömyys, sekä 4-GFSK modulaatioon verrattuna parempi vastaanottimen herkkyys. 2-GFSK:n herkkyys on hieman FSK:n herkkyyttä huonompi, mutta kaistankäytön tehokkuuden tuomat edut ovat merkityksellisempiä. Symbolinopeutena käytetään 50 kb/s, jolla saavutetaan lyhytkestoinen tiedonsiirto riittävällä vastaanottimen herkkyydellä. Taajuusdeviaatio on 25 kHz, jolloin modulaatioindeksi on 1.

Verkko muodostetaan tähtitopologialla, jossa yksi laite toimii isäntälaitteena. Verkon muut laitteet lähettävät anturitietoa itsenäisesti tietyn viivein. Anturitietoa lähettävät laitteet asetetaan lepotilaan lähetyksien väleissä. Lähetykset kuitataan isäntälaitteen lähettämällä ACK-viesteillä. Tähtitopologia sopii käyttötarkoitukseen varsin hyvin säästäten pariston virtaa. Toisin vertaisverkossa, jossa kaikki laitteet voivat kommunikoida keskenään laitteiden pitää pysyä väliajat vastaanottotilassa. Vastaanottotilan virrankulutus on liian suurta vaadittuun pitkäaikaiseen käyttöön.

Lähetettävä data käsitellään spektrin tasoituksella (whitening), mikä tasaisen spektrin lisäksi helpottaa vastaanottimen toimintaa [10]. Lähetysvaiheessa käytetään myös tehorrampia, joka on määritetty oletuksen mukaiseksi. Virheenkorjausta (FEC) ei käytetä lisääntyneen virrankulutuksen takia. Pakettien siirron virheentunnistuksessa käytetään 16-bittistä CRC-koodia, mikä lisätään automaattisesti lähetysvaiheessa. Siirtokehystenä käytetään CC1200-radiopiirin standardimuotoista rakennetta vaihtuvalla pakettipituudella. Ohjelmoinnin edetessä siirtokehystä voidaan kehittää tarpeisiin mukautuvaksi.

6 KONTROLLIOHJELMISTO

Työ aloitettiin tutkimalla TI:n tarjoamaa CC1200-piirin esimerkkiohjelmaa. Esimerkin koodirakenne on esimerkillisesti rakennettu hyvillä kommentteilla ja täten helposti ymmärrettävää. Esimerkin pohjalta oli luontevaa rakentaa yksinkertainen kokeilu laitteen ominaisuuksien ja mahdollisuuksien selvittämiseksi. Toimeksiantajan kanssa käytiin keskusteluja radiolinkin ominaisuuksista ja vaatimuksista, joilla yhteyttä aloitettiin rakentamaan ohjelmistotasolla. Ohjelmiston kääntäminen ja lataaminen TrxEB:n MSP430-prosessorille onnistuu IAR Embedded Workbench –ohjelmistolla. Ohjelmiston lataus ja virheenkorjaus vaatii MSP430 USB-Debug-Interface:n käyttöä.

Anturitietoa lähettävän mittausyksikön toimintakaavio on esitetty liitteessä 2.

6.1 Esimerkkiohjelmiston analyysi

Jotta CC1200-piiriä voidaan hallita ohjelmallisesti, ensin pitää määritellä porttiasetukset sekä SPI-väylä. Esimerkkiohjelma tarjoaa valmiit funktiot sisältävät ohjelmatiedostot, joilla asetusten määrittäminen tapahtuu varmasti oikein. Asetuksiin lukeutuu myös näytön käyttöönotto toiminnan tarkkailua ja virnehallintaa varten. Kun prosessorin ja RF-piirin välinen tiedonsiirto toimii, voidaan siirtää RF-piirin SmartRF Studiolla muodostetut asetukset. Asetukset ovat lähes yhtäläiset molemmissa laitteissa, ainoa ero on lähetys ja vastaanoton jälkeiset tilojen vaihdot. Asetuksia voi syöttää myös ohjelman aikana, jos jokin toiminto on asetuksesta riippuvainen.

Esimerkkikoodin mukainen paketin lähetys on yksinkertaista. Lähetettävät merkit ovat 8-bittisiä symboleja, jotka voivat saada 256 arvoa. Merkit kirjoitetaan lähetyspuskuriin (TXFIFO) puskkeena. Kirjoittaessa on merkittävä myös puskkeen pituus. Kirjoitusfunktio aktivoi SPI-yhteyden, lähettää asetetut symbolit ja odottaa kunnes siirto on onnistunut. Viestin lähettämiseksi piirille syötetään komento STX (Strobe TX), joka käynnistää lähetimen. Lähetysoperaatio ei ota kantaa, mitä dataa TXFIFO sisältää. Sen ollessa tyhjä lähetettävä paketti sisältää ainoastaan alukkeen ja synkronointisanan. RF-piirin asetuksilla voidaan määrätä lähetyksen jälkeinen tila. Tilanvaihdolla voidaan toteuttaa nopeaa kaksisuuntaista tiedonsiirtoa.

Vastaanottaakseen dataa laite pitää asettaa RX-tilaan komennolla SRX (Strobe RX). Saapuvaa pakettia odotetaan while-silmukassa. Paketin saapuessa vastaanottoimeen muodostetaan prosessorille keskeytyssignaali. Saapuneen paketin merkkien lukumäärä luetaan FIFO_NUM_RXBYTES –rekisteristä. Jos lukumäärä on suurempi kuin 0, tarkistetaan paketin virheettömyys. Rekisteristä luetaan MARCSTATE-osoitteen tila, joka rajataan bittikuviolla 0x1F. Saatu tulos on MARC-tila, mikä kertoo RF-piirin sen hetkisen tilan. Jos havaitaan, että tila on RX_FIFO_ERROR, rekisteri on virhetilassa ali- tai ylivuodon seurauksena. Virhetilanteessa RX FIFO tyhjennetään komennolla SFRX (Strobe Flush RX). Muutoin oletetaan, että paketti on virheetön ja se luetaan ohjelman varaan muistipuskuriin. Lukufunktion yhteydessä ilmoitetaan luettavien merkkien lukumäärä. Vastaanotetut merkit ovat samoin 8-bittisiä symboleja. Vastaanotin voidaan asettaa hylkäämään paketti automaattisesti, jos paketin pituus, osoite, tai CRC-arvo ei täsmää. Onnistuneen vastaanoton jälkeinen tila voidaan määrätä rekisteriasetuksella. Oletuksena laite palautuu IDLE-tilaan, josta voidaan siirtyä takaisin RX-tilaan.

6.2 Tietueet

Lähetettävän datan kerääminen ja yhdistäminen, sekä datan tulkinta vastaanottimessa ovat toimenpiteitä, joita voi tehdä usealla eri tavalla. Tietue on tapa koota erityyppistä tietoa yhdeksi kokonaisuudeksi. Kokonaisuuteen voidaan viitata yhteisellä nimellä. Tietue auttaa järjestelemään ja käsittelemään tietoa joustavasti. Tietueen käyttö yksinkertaistaa lähetystä ja vastaanottoa, jos lähetettävä data sisältää paljon erityyppistä tietoa. Anturijärjestelmissä lähetettävä data voi sisältää anturidatan lisäksi esimerkiksi aikaleiman, osoitteen sekä muuta toiminnan kannalta hyödyllistä tietoa. Erilaiset tiedot on helppo koota merkkijonoksi lähetyspäässä, mutta vastaanotossa sen purkaminen voi olla haasteellista eri kenttien pituuksien ollessa vaihtelevia. Jotta tietuetta voidaan käyttää, se pitää määritellä yhtäläiseksi lähetys- ja vastaanottopäissä. Koska tietueen koko on vakio, sen lähettäminen onnistuu myös vaihtuvamittaisen paketin yhteydessä.

Järjestelmästä ja kääntäjästä aiheutuen tietueen hyödynnettävä muistikapasiteetti ei välttämättä vastaa sen käyttämää muistia. Syynä ovat täytetävät (padding), joita kääntäjä voi lisätä täytteeksi nopeuttamaan prosessorin toimintaa. Otetaan esimerkki 32-bittisestä järjestelmästä. Optimaalisen muistinhallinnan seurauksena muistia kannattaa lukea ja kirjoittaa 32 b:n lohkoissa, eli 4 B:a kerralla. Muisti ryhmitellään 4 B:n lohkoiksi, jolloin käsiteltävän muistipaikan osoite on jokin 4:n kerrannainen. Jos data ei ole 4 B:n

kokoinen, sen perään lisätään täytetäviä, jossa saavutetaan optimaalinen pituus. Täytetävät eivät ole hyödynnettävissä ja kuluttavat muistikapasiteettia. Huonosti järjestetty tietue voi käyttää muistia paljon enemmän, mitä sen hyötykapasiteetti on. Kuvassa 18 on esitetty erään tietueen järjestys muistissa. Huomataan että 6 B:n tietue vie muistia 12 B:n edestä.

```
struct {char c; int x; short s} ex1;
```

0 c	1 padding	2 padding	3 padding
4 x	5 x	7 x	8 x
9 s	10 s	11 padding	12 padding

Kuva 18. Täytetäviä (padding) sisältävä tietue. [20]

Tietueen muuttujien järjestyksellä voidaan vaikuttaa täytetävien määrään. Täytetävien käyttö on järjestelmäkohtaista, eikä asiaa esitetä tässä tarkemmin. IAR Embedded Workbenchin C-kääntäjä huolehtii tietueen järjestelystä automaattisesti, jolloin muistin käyttö on optimaalista. Kuvan 18 tietue järjestyisi siten, että se veisi muistia 7 B. Tietueen pakkaaminen ei ole prosessorin kannalta tehokasta, mutta usein sulautetuissa järjestelmissä muistikapasiteetin optimointi on tärkeämpää kuin nopeuden maksimointi.

6.3 Virranhallinta

Paristokäyttöisen laitteen virrankäyttö pitää optimoida tarkkaan. Radiopiiriin pitää herätä lepotilasta nopeasti lähettämään haluttu viesti, jonka jälkeen palata uudelleen lepotilaan odottamaan seuraavaa käskyä. Lähetyksajan virrankäyttöön voidaan vaikuttaa lähetystekniikalla ja paketin pituudella, johon ohjelmistolla ei ole varsinaisesti osuutta. Radiopiiri määrätään lepotilaan komennolla SPWD (Strobe Power Down), mikä tapahtuu CS-linjan tason vaihtuessa {0,1}. Lepotila pysyy, kunnes CS-linjan taso vaihtuu {1,0}. Lepotilan jälkeen siirrytään tilaan IDLE. Rekisteriasetukset eivät katoa lepotilassa ja radiopiiri voidaan prosessorin käskystä siirtää uudelleen TX- tai RX-tilaan. Prosessorin virranhallintaan ei puututa tässä työssä, koska lopullinen järjestelmä tulee olemaan erityyppinen. [4]

Lähetysteholla on suuri merkitys virrankulutukseen. On turhaa lähettää suurella teholla, jos pienempikin teho riittäisi vastaanottimelle. Niinpä vastaanotin asetettiin mittaamaan

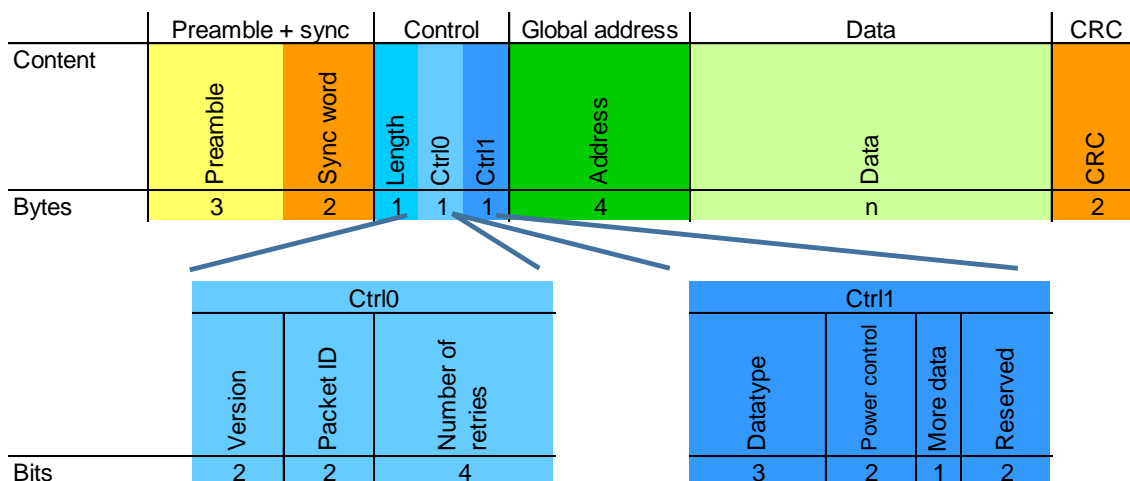
signaalin vahvuutta (RSSI) vastaanoton aikana. Määriteltiin rajat, joiden sisässä signaalin vahvuus on matala mutta riittävä. Lähetystekhoa muutetaan, jos vastaanottoteho poikkeaa asetetuista rajoista. Tieto lähetystekhon analyysistä siirretään ACK-paketin välityksellä lähettimelle. Lähettimen ohjelmaan on muodostettu taulukko, jossa on 7 eri tehoarvoa. Tehoa joko nostetaan, lasketaan tai pidetään samana komennon mukaisesti taulukossa siirtyen. Tehon laskemiseksi vaaditaan 3 peräkkäistä komentoa, koska olosuhteiden muutokset voivat aiheuttaa lyhytkestoisia muutoksia signaalin vahvuuteen. Lähetystekhoarvot ovat 14, 12, 10, 8, 6, 3 ja 0 dBm. Tehon muutos suoritetaan kirjoittamalla rekisteriin tehoa vastaava arvo. Jos lähetyksyksikkö ei vastaanota ACK-pakettia toisen lähetyksyrityksen jälkeen, se siirtyy automaattisesti käyttämään suurinta käytettävissä olevaa tehoa. Sillä varmistetaan lähettimen palautuminen, jos muuttuvat olosuhteet ovat aiheuttaneet signaaliin vaimennusta.

Lähetyksien väliin käytettävä aika on suuressa merkityksessä virrankulutukseen. Tarpeen vaatiessa aikavälin muutos tulee olla mahdollisimman helppoa. Lähetystekhon säätelyn tapaan ACK-paketissa siirretään myös tieto viiveestä, jota käytetään lähetyksien väleissä. Prosessorin on tarkoitus olla lepotilassa kaikkina mahdollisina aikoina jolloin sitä ei tarvita. Lähetysaikaväli voidaan siirtää ACK-paketista ajastimen aikamuuttujaksi, joka laukaisee keskeytyksen herättääkseen prosessorin lepotilasta. Aikavälillä saadaan aikaan myös laitteiden synkronointi, jolla pienennetään päällekkäisten lähetyksien mahdollisuutta.

6.4 Kehysrakenne

Tiedonsiirrossa päädyttiin käyttämään oletuksenmukaista kehysrakennetta, jossa on vaihtuvamittainen datakenttä. Vaikka vaihtuvamittaisuus vaatii yhden ylimääräisen tavun lähetykseen merkitsemään viestin pituutta, sen katsottiin yksinkertaistavan operaatioita. 802.15.4g:n mukainen kehysrakenne olisi ollut toinen vaihtoehto, mutta sen käytössä ei havaittu merkittävää etua.

Kaikki laitteiden välinen tiedonsiirto tapahtuu yhdenmukaisella siirtokehysrakenteella, joka on esitetty kuvassa 19. Yhdenmukainen siirtokehys yksinkertaistaa toimintaa sekä helpottaa myöhempää jatkokehitystä.



Kuva 19. Tiedonsiirrossa käytettävä kehysrakenne.

Kehys muodostetaan tietueesta, jonka ensimmäinen tavu on oltava tietueen koko tavuina. Pituustavua ei lueta pituuteen. Auke (preamble) 3 B, synkronointitavut (sync word) 2 B sekä CRC-koodi lisätään automaattisesti lähetysvaiheessa. Laitteistotason osoitesuodatusta ei pääasiassa käytetä, siksi osoitekenttä ei ole heti pituustavun jälkeen.

Hallintatavut (*Ctrl0*, *Ctrl1*) on määritetty alkuun. Ensimmäisessä hallintatavussa siirretään protokollaversio sekä paketin hallintaan liittyvää informaatiota. *Packet ID* määrittää lähetyksien järjestyksen numeron. *Number of retries* on peräkkäisten epäonnistuneiden lähetyksien lukumäärä. Toinen hallintatavu sisältää kehyksen datatyyppin sekä tehonsäädön. *More data* –bitti määrää vastaanottimen siirtymään uudelleen RX-tilaan, jolloin se odottaa lisää dataa lähetyksi. *Reserved*-bitit eivät ole käytössä.

Hallintatavuja seuraa osoitekenttä, joka on 32 b. Osoitekenttää käytetään ilmoittamaan anturitietoa lähettävän laitteen osoite. ACK-viestien lähetyksissä käytetään vastaanotettua osoitetta, jolloin anturitietoa lähettänyt laite tietää datan kuitatuksi.

Hallintakentän datatyyppi määrittelee siirtokehyksen käyttötarkoituksen sekä datakentän tyyppin. Datakentässä voidaan siirtää anturidataa tai asetuksia. ACK-viestit eivät sisällä datakenttää, koska niiden pituus pidetään mahdollisimman lyhyenä. Kuvassa 20 on esitetty anturidatan kehysrakenne.

Data0			...			DataN		
Position/addr	Sensor type	Meas data	Position/addr	Sensor type	Meas data	Position/addr	Sensor type	Meas data
1	1	4	1	1	4	1	1	4

Kuva 20. Mittausdatan rakenne ja pituudet tavuina siirtokehyksen datakentässä.

Yhdelle anturille varattu 6 B, on ohjelmassa esitelty erillisessä tietueessa, jota voidaan kopioida siirtokehyksen tietueen sisälle taulukkona N-kappaletta. Näin voidaan helposti muokata datakentän pituutta mittalaitteen anturilukumäärän mukaisesti. Esimerkkinä 3 anturin mukainen lähetettävän datan kokonaismäärä on 32 B.

6.5 Kantamamittaukset

Laitteiden suorituskykyä arvioitiin ulkotiloissa suoritettavan kantamamittauksen avulla. Samalla testattiin laitteiden luotettavuutta vaativissa olosuhteissa vastaanottoherkkyyden rajalla. Ennen mittausta kantamaa arvioitiin Texas Instrumentsin tarjoaman Excel-laskentataulukon avulla. Laskentataulukko arvioi kantamaksi 0 dBm:n teholla 1 000 m sekä 10 dBm:n teholla 2 000 m. Arviossa otetaan huomioon käytetty radiopiiri, taajuus, laitteiden korkeus maan pinnasta, sekä symbolinopeus. Arviossa käytetään maaheijastuksen vaikutusta, sekä kahden antennin välisen radioyhteyden mitoittamiseen käytettävää Friisin kaavaa [15]. Arviossa käytetyt parametrit vastaavat mittauksen aikana käytettyjä asetuksia.

Kaavalla 2 laskettuna etäisyyden tuplaus aiheuttaa teoriassa 6 dB:n vaimennuksen signaaliin. Käänteisesti 6 dB:n tehonlisäys kasvattaa kantamaa kaksinkertaiseksi. 10 dB:n tehonlisäys siis kasvattaa kantamaa kertoimella:

$$\sqrt{10^{\frac{10 \text{ dB}}{10}}} = 3,16.$$

Laitteen kantamaa mitattiin kahdella eri tehotasolla. Laitteen asetukset olivat kappa-leessa 5.5 esitettyjen asetusten mukaiset. Laitteisiin oli asennettu tämän työn aikana valmistuneet ohjelmistot. Lähetettävien pakettien hyötydatan pituus oli 30 B, mitkä kuitattiin 6 B:n pituisilla ACK-viesteillä. Viestejä lähetettiin noin sekunnin välein. Laitteisiin

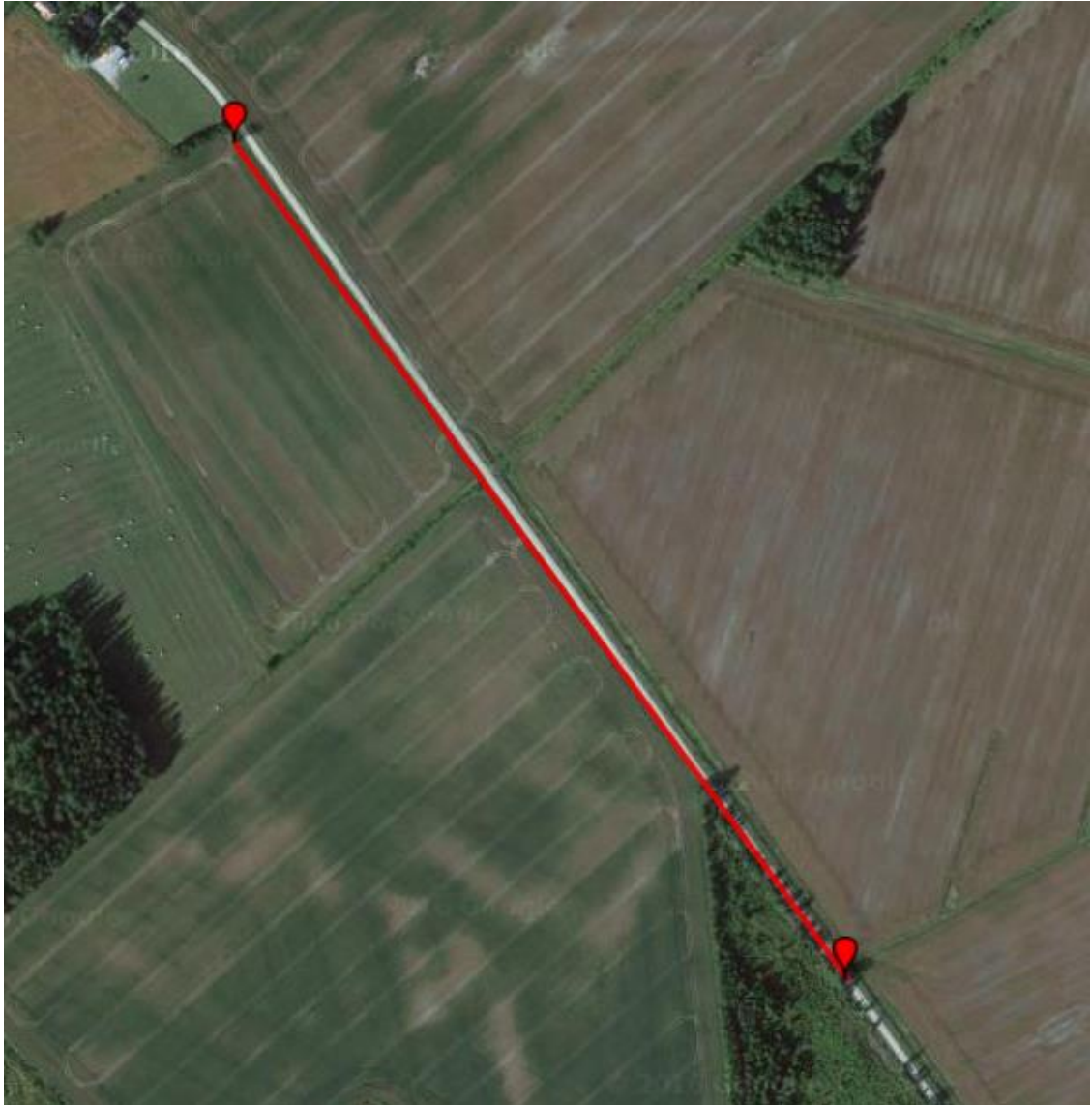
oli kytketty virta kahdella AA-paristolla. TrxEB:n elektroniikka nostaa paristoista saatavaa jännitettä niin, että CC1200-piirin käyttöjännite on 3,3 V. Anturidataa lähettävän yksikön lähetystehoa vaihdeltiin. Vastaanottavan sekä ACK-paketteja lähettävän yksikön teho pidettiin 14 dBm:n vakiotasolla.

Mittaus suoritettiin soratien yli 2 000 m pitkällä suoralla kuvan 21 osoittamassa ympäristössä. Toinen laite asetettiin 0,8 m korkean talousjakkaran päälle, ja toista yksikköä pidettiin käsien varassa samalla korkeustasolla. Lähtöpisteen GPS-koordinaatit määritettiin matkapuhelimen avulla ja kirjattiin muistiin. Tiellä kuljettiin kuvan osoittamaan suuntaan, kunnes pakettien siirtyminen muuttui epävarmaksi ja lähestyttiin herkkyysrajaa.



Kuva 21. Kantaman mittausympäristö.

Aluksi mitattiin 0 dBm:n lähetysteholla kantamaksi 570 m, millä etäisyydellä pakettien siirto onnistui vielä vaihtelevasti. Kauemmas edeten laite ei kyennyt vastaanottamaan paketteja laisinkaan. Kuvassa 22 on esitetty GPS-koordinaatein määritetty 570 m:n linkki.

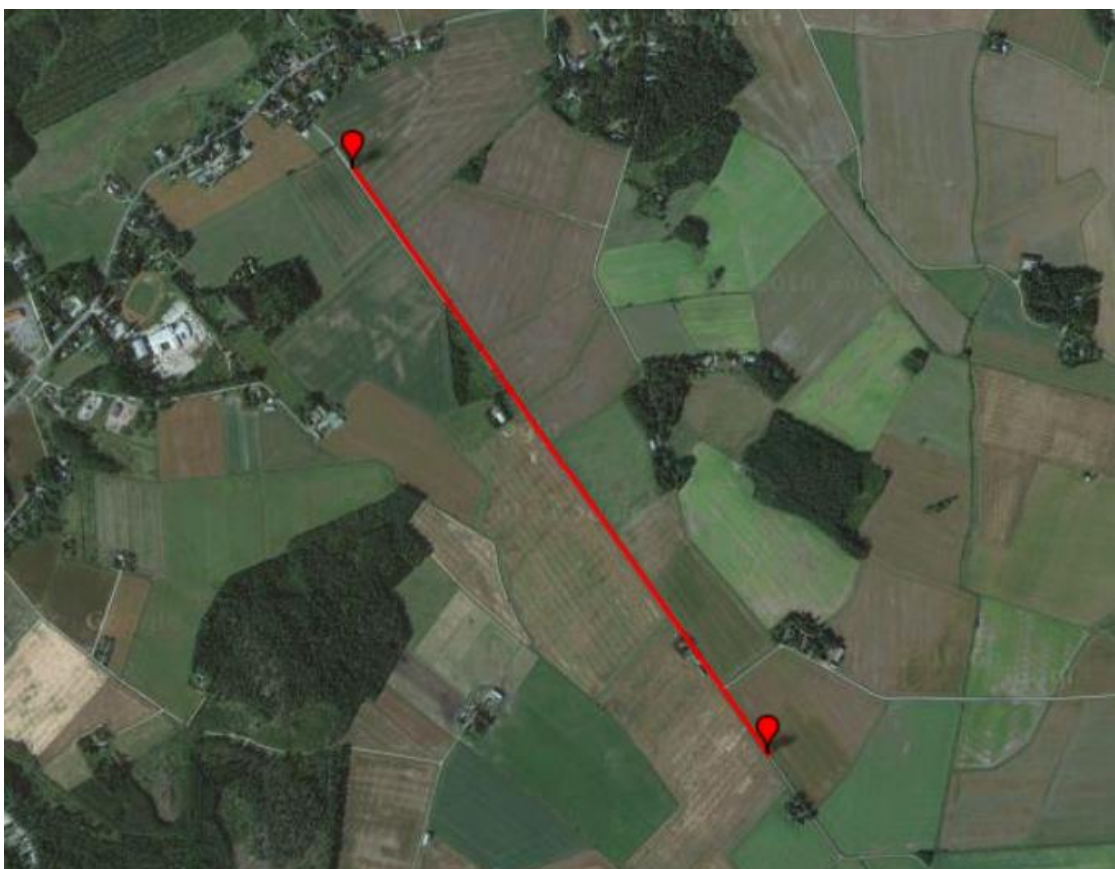


Kuva 22. Kantamaksi mitattiin 0 dBm:n teholla 570 m.

Pidemmän linkin mittaamiseksi paikoilleen sijoitetun laitteen sijaintia muutettiin, jotta pieni metsäsaareke ei peittäisi näköyhteyttä laitteiden välillä. 10 dBm:n teholla kantamaksi mitattiin 1 700 m, minkä linkki on esitetty kuvassa 23. CC1200-radiopiirin herkkyys on ilmoitettu -109 dBm bittinopeudella 50 kb/s [9]. Laitteen ilmoittama RSSI-arvo

oli matalimmillaan -110 dBm, mikä osoittaa laitteen olevan suorituskyvyn olevan kunnossa. Laitteet toimivat odotetusti herkkyysrajan tuntumassa. Siirryttäessä kantaman ulkopuolelta takaisin kantaman alueelle, laitteet jatkoivat normaalisti tiedonsiirtoa.

Teoriassa 10 dB:n tehonlisäys olisi pitänyt lisätä kantamaa 570 m:stä noin 1 800 m:iin. Mitattu kantaman kasvu on hieman laskennallista alhaisempi. Ero saattaa johtua mitausolosuhteiden muutoksesta sekä lisävaimennusta aiheuttavista tekijöistä, sillä mitausjärjestely ei täyttänyt vapaan tilan vaatimuksia. Täydellä 14 dBm:n teholla laskennallinen kantamaodotus on lähes 3 000 m. Käytännön syistä mittausta ei ollut mahdollista suorittaa täydellä teholla.



Kuva 23. Kantamaa mitattiin 10 dBm:n teholla. Kuvan osoittama etäisyys on 1 700 m.

7 YHTEENVETO

Tässä insinööriyössä kehitettiin Pietiko Oy:lle langattoman anturiverkon kontrolliohjelmisto sekä protokolla. Työhön sisältyi langattoman tiedonsiirron laatuun vaikuttavien ominaisuuksien tutkimista sekä analysointia. Virrankulutusta vertailtiin erilaisilla kokoonpanoilla. Lopullinen protokolla rakennettiin toiminnaltaan energiatehokkaaksi ja luotettavaksi. Työn kokonaisuus pidettiin hallinnassa jättämällä pois alun perin suunniteltu antennidiversiteetin testaus.

Työ aloitettiin tutkimalla TI:n tarjoamia esimerkkiohjelmia samalla tutkien vaatimustason edellyttämiä asetuksia. Erilaisia asetuskokoonpanoja rakennettiin SmartRF Studion avulla ja niiden toimivuutta tarkkailtiin Packet Snifferillä. Ohjelmiston kehityksessä suurena apuna toimi Texas Instruments E2E Community –keskustelufoorumi, josta löytyi ratkaisu moneen kohdattuun ongelmaan.

Ohjelmisto täyttää Pietiko Oy:n asettamat vaatimukset. Ohjelmiston toimintaa ei voitu testata oikeassa anturiverkossa, koska tuote ei ollut vielä tämän työn valmistumishetkellä siihen vaaditussa kehitysvaiheessa. Ohjelmiston kehitys yhteensopivaksi lopullisen tuotteen vaatimuksiin jää toimeksiantajan tehtäväksi.

Ohjelmiston yksinkertainen mutta varma toiminta antaa tarvittaessa hyvät lähtökohdat jatkokehitykselle monimutkaisempiin järjestelmiin. Teollisuuden tuotannon valvonta lisääntyy, jolloin markkinanäkymät erilaisille langattomille anturijärjestelmille ovat erinomaiset.

LÄHTEET

- [1] Electromagnetic waves and radio propagation. [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.radio-electronics.com/info/propagation/em_waves/electromagnetic_waves.php (luettu 21.3.2016).
- [2] Hanhela, Ari, *Antennidiversiteetin toteutus ja testaus 2,45 GHz:n radiomoduuliin*, <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201105259556>
- [3] Gylan, Henry, *Digitaalinen tiedonsiirtotekniikka*.
- [4] Texas Instruments, *CC1200 User's Guide*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/ug/swru346b/swru346b.pdf> (luettu 23.3.2016).
- [5] Tomislav Švedek, Marijan Herceg, Tomislav Matic, *A Simple Signal Shaper for GMSK/GFSK and MSK Modulator Based on Sigma-Delta Look-up Table*. [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.radioeng.cz/fulltexts/2009/09_02_230_237.pdf (luettu 1.4.2016).
- [6] Vaara-Sjöblom, Elina, *Verkonmuodostus ja -hallinta IEEE 802.15.4 –standardiin perustuvassa sensoriverkossa*. [www-dokumentti] https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/18723/URN_NBN_fi_jyu-200806305569.pdf?sequence=1 (luettu 29.3.2016).
- [7] Texas Instruments, *CC1111/CC2511 USB HW User's Guide*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/ug/swru082b/swru082b.pdf> (luettu 3.4.2016).
- [8] Wikipedia (EN), *IAR Systems*. [www-dokumentti]. Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/IAR_Systems (luettu 2.4.2016).
- [9] Texas Instruments, *CC1200 Datasheet*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1200.pdf> (luettu 21.3.2016).
- [10] Texas Instruments, *Data whitening and random TX mode*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/an/swra322/swra322.pdf> (luettu 14.4.2016).
- [11] Stallings, William, *Wireless communications and networking*. 2nd ed. Upper Saddle River (NJ) : Pearson Prentice Hall, 2002. 584s. ISBN: 0-13-040864-6.
- [12] McCune, Earl, *Practical digital wireless signals*. New York : Cambridge University Press, 2010. 407s. ISBN: 0-521-51630-7.
- [13] sparkfun, *Serial Peripheral Interface (SPI)*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi> (luettu 12.3.2016).
- [14] Texas Instruments, *SmartRF Transceiver Evaluation Board "TrxEB" User's Guide*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/ug/swru294a/swru294a.pdf> (luettu 28.3.2016).
- [15] TI E2E Community, *Excel sheet to estimate range for Indoor and Outdoor*. [www-dokumentti]. Saatavilla: http://e2e.ti.com/support/wireless_connectivity/proprietary_sub_1_ghz_simpliciti/f/156/t/375556 (luettu: 25.4.2016).
- [16] Texas Instruments, *CC1200*. [www-sivusto]. Saatavilla: <http://www.ti.com/product/cc1200> (luettu 19.3.2016).

- [17] EngineersGarage, *FSK Modulators using IC 555*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.engineersgarage.com/electronic-circuits/fsk-modulators-using-ic-555> (luettu 29.3.2016).
- [18] Circuit Design, Inc, *Digital modulation: Frequency shift keying (FSK, MSK)*. [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.cdt21.com/resources/Modulation/modulation_FSK.asp (luettu 2.4.2016).
- [19] Hindawi, *The Exploration of Network Coding in IEEE 802.15.4 Networks*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.hindawi.com/journals/ijdmb/2011/310647/> (luettu 2.4.2016).
- [20] ARM, *ARM Developers and Libraries Guide*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://infocenter.arm.com/help/topic/com.arm.doc.dui0067d/DUI0067.pdf> (luettu 27.3.2016).
- [21] Wikipedia, *Fresnel Zone (ENG)*. [www-dokumentti]. Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_zone (luettu 4.4.2016).
- [22] TI E2E Community. [www-sivusto]. Saatavilla: https://e2e.ti.com/support/wireless_connectivity/low_power_rf_tools/f/155/t/73591 (luettu: 10.4.2016).
- [23] Wikiwand, *Electromagnetic radiation*. [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.wikiwand.com/en/Electromagnetic_radiation (luettu 18.5.2016).

Liite 1 Esimerkkikoodi LBT:n käytöstä

```
// Asetetaan LBT käyttöön ja asetetaan kynnysarvoksi -90 dBm

writeByte = 0x10;

cc120xSpiWriteReg(CC120X_PKT_CFG2, &writeByte, 1);

writeByte = 12;

cc120xSpiWriteReg(CC120X_AGC_CS_THR, &writeByte, 1);

// Lähetetään paketteja, kunnes kytkintä painetaan

do {

    // Rakennetaan satunnainen paketti erillisellä funktiolla
    // Paketti sisältää pituustavun

    createPacket(txBuffer);

    // Kirjoitetaan paketti TX FIFO:oon

    cc120xSpiWriteTxFifo(txBuffer, sizeof(txBuffer));

    // Asetetaan RX-tila

    trxSpiCmdStrobe(CC120X_SRX);

    // Odotetaan, kunnes RSSI on alle asetetun arvon -90 dBm

    do {

        cc120xSpiReadReg(CC120X_RSSI0, &rssi, 1);

    } while (!(rssi & 0x01));

    // Syötetään komento STX paketin lähettämiseksi

    trxSpiCmdStrobe(CC120X_STX);

    // Odotetaan keskeytystä paketin lähettämisestä
    // (Oletetaan että radioRxTxISR-keskeytysfunktioon yhdistetty
    // GPIO on asetettu rekisterissä arvoon GPIOx_CFG = 0x06)

    while(packetSemaphore != ISR_ACTION_REQUIRED);

    // Kuitataan semaphore -lippu

    packetSemaphore = ISR_IDLE;

} while (!bspKeyPushed(BSP_KEY_ALL));
```

Liite 2 Mittausyksikön toimintakaavio

